

論文 / 著書情報
Article / Book Information

題目(和文)	眼球運動による精神活動と学習環境の測定に関する基礎的研究
Title(English)	Evaluation of learner's activity and educational circumstances by pupil size and eye movements.
著者(和文)	中山実
Author(English)	MINORU NAKAYAMA
出典(和文)	学位:工学博士, 学位授与機関:東京工業大学, 報告番号:甲第2224号, 授与年月日:1990年3月26日, 学位の種別:課程博士, 審査員:清水康敬
Citation(English)	Degree:Doctor of Engineering, Conferring organization: Tokyo Institute of Technology, Report number:甲第2224号, Conferred date:1990/3/26, Degree Type:Course doctor, Examiner:
学位種別(和文)	博士論文
Type(English)	Doctoral Thesis

眼球運動による精神活動と
学習環境の測定に関する基礎的研究

1990年 1月

指導教官：清水康敬教授
坂元 昂教授

提出者 中山実

目次

第1章 緒論

1. 1	教育評価について	1
1. 2	眼球運動測定 of 歴史的背景	5
1.2.1	瞳孔反応	5
1.2.2	視点移動	6
1. 3	眼球運動	8
1. 4	本研究の目的	16
1. 5	本論文の概要	16

第2章 眼球運動の測定法

2. 1	まえがき	20
2. 2	アイカメラ	20
2. 3	測定システム	25
2.3.1	瞳孔面積の測定	25
2.3.2	視点移動の測定	31
2. 4	まとめ	32

第3章 輝度と瞳孔面積の関係

3. 1	まえがき	33
3. 2	実験方法	35
3.2.1	提示パターン	35
3.2.2	提示方法	36
3. 3	実験結果	38
3.3.1	空間周波数との関係	38
3.3.2	視野角との関係	41
3.3.3	提示時間との関係	42
3. 4	考察	44
3. 5	まとめ	45

第4章 音声による課題を与えた時の瞳孔面積変化

4. 1	まえがき	4 6
4. 2	パターン提示中に課題を与えた時の瞳孔面積変化	4 7
4.2.1	実験方法	4 7
4.2.3	実験結果	4 9
4. 3	音声課題のみによる瞳孔面積変化	6 2
4.3.1	実験方法	6 2
4.3.2	実験結果	6 2
4. 4	まとめ	6 5

第5章 瞳孔面積変化からの輝度の影響の分離

5. 1	まえがき	6 6
5. 2	提示画面の輝度による瞳孔面積変化	6 7
5.2.1	提示パターンの作成方法	6 7
5.2.2	実験方法	6 9
5.2.3	実験結果	7 0
5. 3	輝度変化のみによる瞳孔面積変化	7 3
5.3.1	実験方法	7 3
5.3.2	実験結果	7 3
5.3.3	瞳孔面積の補正	7 8
5. 4	瞳孔面積変化による提示画像の評価	8 1
5.4.1	実験方法	8 1
5.4.2	実験結果	8 3
5. 5	まとめ	8 9

第6章 音環境が与える音読速度への影響と瞳孔面積変化

6. 1	まえがき	9 0
6. 2	実験方法	9 1
6.2.1	提示パターン	9 1
6.2.2	提示方法	9 2
6.2.3	音環境条件	9 3
6.2.4	音読速度の測定	9 3
6.2.5	被験者に関する調査	9 5

6. 3	実験結果	9 5
6.3.1	音読速度の結果	9 5
6.3.2	瞳孔面積の結果	9 5
6.3.3	音読速度と瞳孔面積の結果	9 8
6.3.4	被験者の特性との関係	9 9
6. 4	音圧の影響	1 0 4
6.4.1	実験方法	1 0 4
6.4.2	実験結果	1 0 4
6. 5	まとめ	1 0 8

第7章 動画と静止画に対する文字スーパーへの視点移動の違い

7. 1	まえがき	1 0 9
7. 2	実験方法	1 1 0
7.2.1	提示パターン	1 1 0
7.2.2	提示方法	1 1 1
7.2.3	測定方法	1 1 1
7. 3	実験結果	1 1 3
7.3.1	動画、静止画における視点移動	1 1 3
7.3.2	動画、静止画での文章の読切時間	1 1 6
7.3.3	文字スーパーに対する停滞率	1 1 8
7.3.4	被験者へのインタビュー	1 2 0
7. 4	瞳孔面積との関係	1 2 1
7.4.1	動画、静止画における瞳孔面積	1 2 1
7.4.2	画面の輝度との関係	1 2 1
7. 5	まとめ	1 2 6

第8章	結論	1 2 7
-----	----	-------

謝辞	1 3 0
本研究に関する報告	1 3 1
参考文献	1 3 5

第 1 章

結 論

1. 1 教育評価の役割と方法

教育工学の立場での教育評価は大変重要であり、教授者側はいつも何等かの形で学習者を評価している。評価について、B. S. ブルームは、「評価はその教授過程を導く目的で行なわれるもので、評価を伴わない教授活動は、おそらく教授活動と呼ぶことはできないであろう」と指摘している[1]。

評価は単に学習者個人の能力の到達度を調べるだけでなく、教材や学習の流れ、教材の提示方法や評価法そのものの評価などと、多岐にわたっている。これらの評価を基に、教授者側にもフィードバックを行ない、教授法や教材の作成技法の改善に役立てられるものと考えられる。すなわち、教育成果を高めるために、学習者に付与されるものも、また評価の対象となってきた[2]。今日の教育評価は認知的な側面からの評価が優先され、情意的な側面、興味や態度の変容などの評価は犠牲にされてきた。これらの技法、たとえば生徒の態度を変える、数学を楽しく勉強させるような技法は明確には示されていない。しかしながら、これらの成果は認知的な成果と非常に密接に関係していると指摘されている。学習者の態度を変えるために用いた何等かの手段に対して、学習者がどのように反応したかという情報は、教育過程を改善する際に、有益な示唆を与えられとされる[1]。

また、教育工学ではこれらの評価は学習者集団ばかりでなく、1個人の学習活動についても同様に考えられており、学習者個人に適応した教授方法や教材が与えられるべきであると考えている。「個性を育てる教育」や「一人ひとりに適応した教育」の目標が掲げられ、その目標の下にC M IやC A Iが発展してきた。同時にその評価も、画一的なものではなく、教授方法が学習者個人にとって効果

的であったかという、学習者の自己評価が重視されるようになってきた。そのため、個人を対象とした教育測定評価の研究が重要な課題となってきた。このような個人に着目する方法は実験心理学の立場では、科学性に乏しいという理由で、軽視されがちであったが、最近になって、一人の被験者に対して詳細に調べていく方法の重要性が認められるようになってきた。この理由には、

① 1個人について詳細に調べることによって、人間行動の一般性に通ずる発見がなされるという考え方。

② 1個人に処遇や実験条件を設定し、処遇と行動変容との因果関係を明らかにし、他の個人への普遍化を図ろうとする考え方。

があげられる。

これらの考え方は、従来から科学の方法として指摘された、法則定立的方法と個性記述的方法と照し合されて、法則定立的方法の立場では、集団の中の個人として考え、個性記述的方法では他と代えることのできない個人としてとらえるのである。これらの方法は心理学や教育心理学の方面からも着目されている[3]。

教育評価を行なう場合、特に行動のレベルを評価する場合はできるだけ学習者の行動を直接測定することが望ましいが、それが不可能であれば間接的な測定方法を採用しなければならない[4]。

学習者の学習行動そのものを評価する方法は、教育心理学の分野でいくつかその方法が用意されている。それらを以下に示す。

① 観察法

自然的観察法

実験的観察法

② 面接法

試問的面接

調査的面接

診断的面接

③ 評定法

チェックリスト法

選択法

品等法

評定尺度法

④ 質問紙法

矢田部・ギルフォード性格検査など

⑤ 作業検査法

クレペリン検査など

⑥ 投影法

ロールシャッハテストなど

この内、観察法についてはその分類を図1-1に示す[2]。

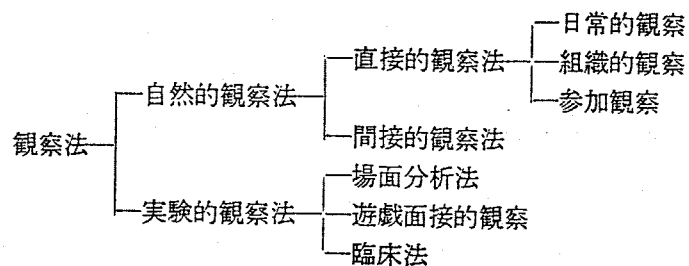


図1-1. 観察法の種類[2].

Fig. 1-1 A kind of observation[2].

これらの学習者の行動の評価は、学習者の学習行動のみの評価に留ることなく、学習者環境の評価、授業（例えば教育実習生による授業や授業方法について）の分析、教材の評価など、様々な評価に応用されている[5]。

しかしながら、いずれの評価も、主観的な評価であることが多く、客観的な結

果を得にくいものである。さらに、その評価しようとするものも、マクロな視点でのみ可能で、時間変化をともなった評価は、事前事後のようにかなりの時間間隔をおいて評価されている。

そのため、授業の中で用いた1つの教授手法や、1部分で利用した教材の評価については実際には評価することは不可能である。

ここでいう客観的な評価は、学習者本人が与えられた処遇に対してどのように反応しているかということである。第3者による評価が不可能であるとすれば、内観法のように学習者本人に自らの状態を報告させることができる。しかし、例えば、「興味を持った」という反応も、どれほど興味を持ったのか自分自身にも測定不可能な量である。このような評価は第3者や本人においても従来の方法では不可能であると言える。

客観的な評価を行なうために、生理学的なアプローチとして学習者の生体情報を評価して、1つの指標とし、それによって教育評価を行なおうとする試みがあり[6]、既に皮膚電気反射（G S R : Galvanic Skin Reflex）、脳波、瞳孔直径（あるいは面積）などが利用されている。特に皮膚電気反射については、リアルタイムで容易に測定できることから、多くの研究があり、授業で学習者の内面的変化や対人関係を客観的に評価している例[7]などがある。

これらの生体情報、とくにG S Rや瞳孔面積は認知的負荷や心的努力の程度とも関連すると言われ、人間の情報処理資源（注意）がどれほど投入されたかを、客観的に測定している試みもある[8]。

また、学習者がどこに注目しているのかも重要な点である。何に興味を持ち、また注意が奪われ、何に対してどのような行動を起こしたのかも評価する必要がある。そのため、学習者の注意が向けられている対象物も同時に測定しておく必要がある。

学習者の注意が向けられている対象物を示す視点と、それに対する心的努力の程度を同時に測定することができれば、学習者の学習行動が正確に評価することができる。

そこで、本論文では生体情報のうち、視点移動と瞳孔面積変化である眼球運動を取りあげ、眼球運動が客観的な教育評価に応用できるかどうかを検討するために、いくつかの実験を実施して、その妥当性を検討した、

1. 2 眼球運動測定の歴史的背景

眼球運動には各種あるが、そのうち狭義の眼球運動としては、瞳孔反応と視点移動があげられる。本節では、瞳孔反応と視点移動について歴史的背景を見ることにする。

1.2.1 瞳孔反応

瞳孔反応については、古くから知られており、起元前に瞳孔の大きさの測定を試みたとされている。10世紀ごろには正常な瞳孔は明るい所で縮小し、暗い所で拡大することがわかっており、17世紀には光量に瞳孔が反応することが、一般に理解されるようになり、以来臨床診断に応用されるようになった[9]。

瞳孔反応が心理学の立場から取り上げられるようになったのは、Hessが心的活動が瞳孔の変化に直接的に、影響を与えることを示してからであるとされている。

Hessは瞳孔反応について、①快適な、または不快な視覚刺激に対する散瞳と縮瞳、②動機づけの強さを測る指標、③味覚刺激への反応、④聴覚刺激への反応、⑤暗算の困難度に対応した反応、などを示唆した[10]。しかし、これらの点は推定の域を出ないものであるとされている[9]。

船津はHessらの問題提起に着目し、心理学的な立場から研究を行なうために、瞳孔計を開発して、先の問題を検討している[11]。

Beattyは記憶などの情報処理での心的負荷を瞳孔直径で評価し、負荷と処理資源（注意）について検討を行い、心的負荷が増すと瞳孔直径が大きくなり、その

変化量は負荷に関係していることを報告している[12]。

ところで、以上までの研究では瞳孔の測定は刺激映像の投影のためのスクリーンを備えた暗箱に、顔面を固定し、刺激映像が提示された時の瞳孔の映像を16mmあるいはテレビカメラでとらえて瞳孔の直径あるいは面積を評価していた。そのため測定データの精度や測定の時間間隔など、測定機器に依存している問題が多かった。

テレビカメラの小型化や電子計測技術の発展により、連続的な映像に対する瞳孔の測定が自由に行なえるようになり、瞳孔面積の測定も容易になってきた。従来までの刺激に対する反応を測定するだけでなく、ある時間内での瞳孔の連続的な変化を測定することも可能となってきた[13]。このことから、先に述べたような教育評価にも瞳孔反応が応用できる可能性がでてきた。

しかし、精神活動に伴う瞳孔反応の発現機構についてはほとんど明らかにされていないのが現状であり、教育評価に応用するためにはその信頼性や妥当性を十分検討する必要がある。

瞳孔反応は情動や注意量、動機づけなど様々な量を反映して起こると言われているが、本研究においては、瞳孔面積は人間のアクティビティのレベルを示しているものと考え、本論文では測定可能な学習者のアクティビティの指標として、応用が可能かについて調べるものである。

1.2.2 視点移動

視点移動（眼球運動）の研究は1957年の第15回国際心理学会で新型の眼球運動測定装置が公開されてからであると言われている。それ以前は読書行動における眼球の水平運動の記録と分析が主な研究であった。その新型の装置によって、現在のように注視点と刺激の映像を重ねて記録することができた。記録ができたものの、集計は停留点を映像に重ねて、プロットするという手作業で行なっていたため、停留点の集計作業が大変な労力となり、眼球運動の研究はあまり進

まなかった[9]。実験方法も、当初は頭部固定器に顎と額をあてて測定する必要があった上、眼球の移動距離にも制限があった。さらに被験者が音声で反応することも大変難しかった。このように、視点移動の研究は測定機器に依存する部分が大きかった。

視点移動の分析方法としては以下の項目について検討がなされてきた[9]。

- ① 停留点 (fixation point)
- ② 微動 (mini-movement)
- ③ 滑動 (slide)
- ④ 飛躍運動 (saccade)
- ⑤ 漂動 (drift)

現在は、軽量で、頭部も自由に動かすことが可能な測定器が市販されるようになり、解析システムも開発されている。視点移動は眼球の相対的な移動について測定しているものであるので、頭部を動かすことによって、実際の視点の位置は大きくずれてしまい、正確な測定が行なえなかったが、最近、外部のマーカを利用したり[14]、磁気センサ[15]を利用することによって、これらを補正し、注視点の絶対位置を自動的に算出するシステムも考案されている。

以上の様な測定装置が発達する一方、視点移動は、作業環境等の分析など人間工学の分野での応用や、臨床医学の方面では疾病発見のために利用される[16]など、眼球運動そのものの研究も各分野で行なわれてきた。

教育の分野でも学習中の視点移動について分析[17]を行なっている例があるほか、新任の教師と経験年数の長い教師のスピーチ中の視点移動の違いを分析した例などがあるが、視点移動の違いの判断は可能であるが、それ以上の意味をもたせられないことも事実であり、その評価の方法が必要である。

いずれの立場においても、視点移動の違いがどのような特徴を表わし、それを如何に数値化して定量化するかが問題となっている[18]。

1. 3 眼球運動

眼はカメラに似た構造であると言われ、対象物へ焦点を合せたり、光の量を調節する機能を持っている。

眼の模式図を図1-2に示す。眼の外観からは、強膜(sclera)（白眼の部分）、虹彩(iris)（眼の色のついた部分）、虹彩に囲まれた黒い開口部の瞳孔(pupil)である。さらに眼の前面を覆っている透明な膜である角膜(cornea)

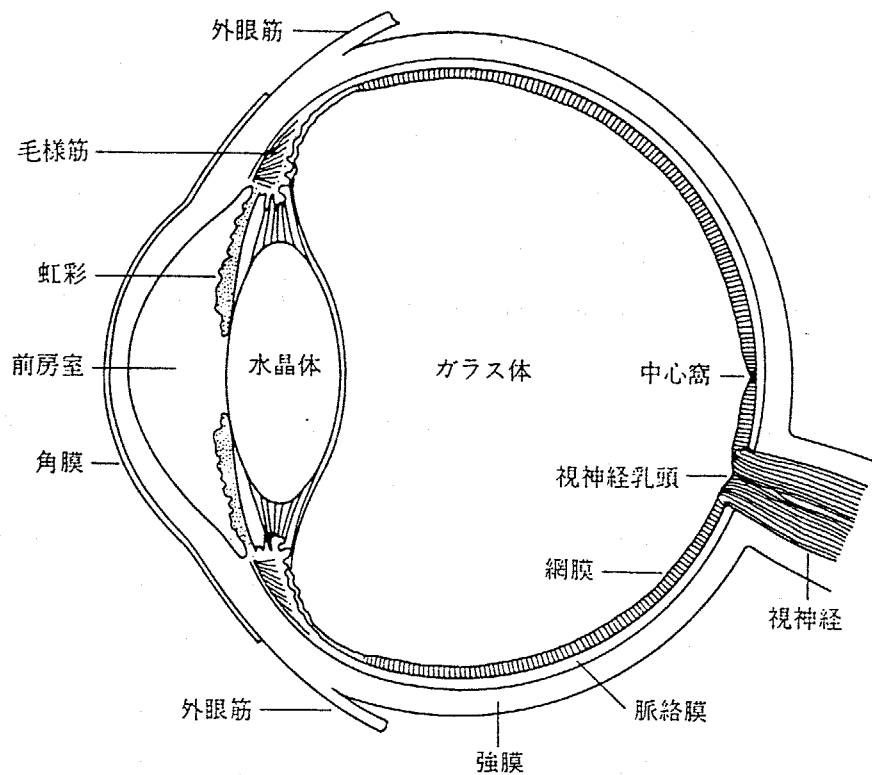


図1-2. 眼の模式図[19]

Fig. 1-2 A model of human eye[19].

がある。角膜は通過する光を屈折させ、光の焦点を眼底に結ぶ役目をしている。眼の内部について見ると、角膜のすぐ後に前房室（anterior chamber）と呼ばれる、眼房水が満たされた腔がある。眼球の内部はガラス体と呼ばれる透明なゼリー状の物質で満たされており、眼を支え、球形状の形を維持している。さまざまな距離にある刺激に焦点が合うように微調整しているのが水晶体（lens）である。水晶体は角膜と同じ様に透明であるが、その形状を変化させることによって、屈折量を調節（accommodation）することができる[19]。

眼底には網膜（retina）が広がっている。網膜は厚さ約0.2mmの透明な膜で、最外層は視細胞層で、その外節部は色素上皮層と密着している。人などの視細胞層は光受容部が円錐状をした錐体（cone）と光受容部が棒状をした杆体（rod）との2種の視細胞からなっている。錐体は明所視を杆体は薄明視をつかさどっていると言われる。人では視軸上に位置する中心窩の部分は錐体のみからなり、周辺部に向うほど杆体が増加する。

解剖学的に見ると、眼球は6本の外眼筋（extraocular muscle）によって眼窩（orbit）の中につけられており、周囲は脂肪で囲まれている。この6本の外眼筋によって、眼球はその中心がほぼ固定された回転運動を行なう[20]。

眼球運動には各種あるが、そのうち狭義の眼球運動として、以下の2つがあげられる。

①眼球内運動（intra-ocular movement）

②眼球自体の運動（ocular movement）

この他、眼球そのものの動きではないが、視覚内容に影響を与えるものとして、③両眼運動、④眼球周辺の運動も加えて広義の眼球運動とすることがある。

このうち、①には毛様体筋による水晶体調節運動と瞳孔括約筋及び散大筋による光彩調節運動がある。後者の方は交感神経と副交感神経によって支配されており、本研究でもとりあげる、心理的な変化による瞳孔反応も含まれる[21]。

②の運動は眼球の回転によるものである。この回転を利用して視点移動を測定することができる。

この2つは後で述べるように、同時に測定可能である。

(1) 瞳孔反応

瞳孔は、光彩に囲まれた2.0~6.0mmの小孔である。光彩瞳孔縁の中に瞳孔括約筋と、瞳孔散大筋が見られ、瞳孔括約筋の収縮によって縮瞳し、光彩を刺激することによって瞳孔散大筋が働いて散瞳するとされている。

瞳孔括約筋と瞳孔散大筋は異なった神経によって支配されている。

瞳孔括約筋は、副交感神経に支配されると考えられている。冷血動物などでは、視神経を切り離した眼に、電氣的、熱あるは光刺激を与えると縮瞳が起こることから、瞳孔括約筋、とくにそれに含まれている色素そのものが、外来の刺激に反応して筋収縮が起こると考えられている。すなわち、上位の神経支配を必ずしも必要とせず、括約筋自体で、感覚機能と運動機能をあわせもっていると考えられているが、人についてはまだ詳しいことは確かめられていない。

瞳孔散大筋は、交感神経によって支配されている。交感神経の中樞はすでに古くから知られており、脊髓前根を刺激すると散瞳が起こり、瞳孔の散大に関与する神経線維が含まれていることが確かめられている。抹消性の神経支配は比較的良好に理解されているが、脊髓中樞による支配については、ほとんど明らかでない。これらの原因は交感神経系の直接の刺激、すなわち、交感神経興奮性の散瞳と、動眼神経の興奮を抑制する線維系の刺激、換言すれば副交感神経抑制性の散瞳が含まれているためであるといわれている。

瞳孔の大きさは括約筋と散大筋の緊張関係によって、一定の範囲内で変化する。したがって、瞳孔の大きさを決定する因子はきわめて複雑であり、その全てを知ることにはできないが、知られている因子として幾つかのものがあげられている。瞳孔そのものの大きさの差には、年齢や性、褐色眼や青色眼による違いがある。精神的にも瞳孔径の変化を起こし、疼痛、恐怖、驚愕、不安などは著明な散瞳を引き起こし、同時に対光反射の著しい減弱を来すとされる。これらの知覚、感情反応は、散大筋の緊張よりも、大脳皮質を介する括約筋の緊張抑制によると考えられているが、詳細は不明である[22]。

瞳孔反応は縮瞳反応と散瞳反応に大きく分けられる。

縮瞳反応には以下のものがあげられる[22]。

- ①対光反射：明るさが一定のしきい値を超えて急激に増加すると、短い潜時の後に瞳孔の収縮が起こる。徐々に明るさを増した場合には、その差がかなり大きくても反応が見られない。反対に僅かな明るさの変化でも、それが急激であれば反応が起こる。
- ②近見反射：近くの物体を見ようとする時、眼球の輻湊と調節が起こるが、同時に両側瞳孔に強い収縮が起こることは古くから知られている。この縮瞳は真の意味の反射ではなく、一種の随伴運動あるいは連合運動であると理解されるようになった。
- ③閉瞼反応：眼瞼を強く閉じる時、あるいは眼瞼を閉じられないように強く開瞼するように努力する時に起こる縮瞳反応を閉瞼反応と呼ぶ。
- ④三叉神経反射：角膜、結膜、時として眼瞼に持続的な強い刺激が加わると、縮瞳する現象をいう。眼に異物が入って強い痛みのあるときの縮瞳の現象は早くから注目されていた。

この他にも、平流電気性瞳孔反射、前庭縮瞳反射、深呼吸時の縮瞳、視覚表象現象、食事後の縮瞳、縮瞳体位反応があると言われている。

散瞳反応としては以下のものがあげられている。

- ①感覚性散瞳反応：抹消感覚刺激、特に痛覚刺激が十分に強い場合には散瞳反応が起こる。
- ②知覚性散瞳反応：主として聴覚が対象となり、強い雑音によって、散瞳反応が起こることは古くから知られている。反復して誘発すると疲労のため反応は速やかに現れなくなる。
- ③精神性散瞳反応：驚愕、不安、怒り、強い期待などの精神過程に伴って、散瞳反応が起こる。この発現機構についてはほとんど明らかにされていないが、一般に交感神経の亢進に基づくものと考えられている。

この他、側方瞥見時の散瞳、遮光反射、消耗状態での散瞳、嗅刺激性瞳孔反射などがある。

この眼球運動を工学的な立場から解析し、眼球運動系、焦点調節系及び瞳孔反射系からなる眼球 triad システムも考案されている [23]。システムの構成図を図 1-3 に示す。図中の各サブシステムは網膜およびそれぞれの感覚中枢、運動中枢および筋系（調節に対しては毛様体筋、瞳孔は光彩の括約・散瞳筋、眼球運動は眼筋）からなっている。本研究の実験では提示パターンから被験者までの距離は一定であるので、このモデルから、眼球運動に大きな影響を与えるのは、光強度、すなわち明るさであることがわかる。

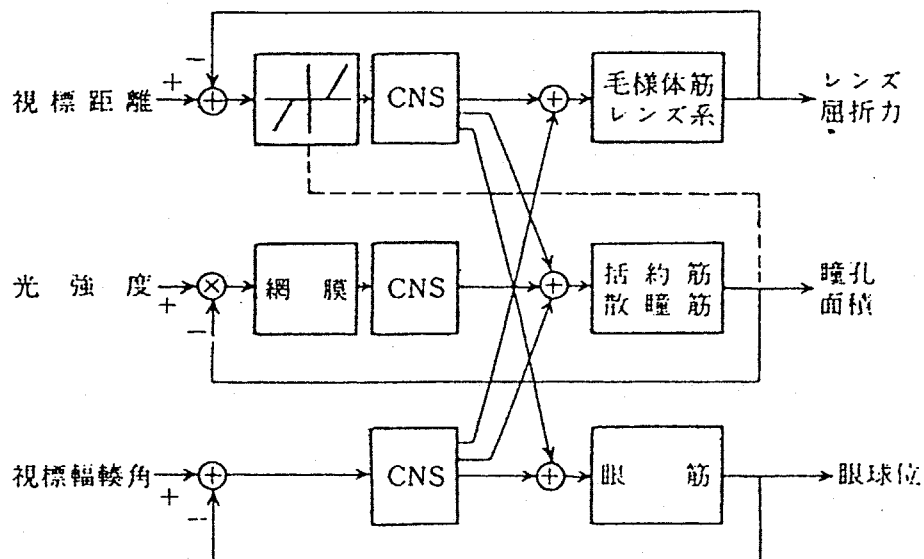


図 1-3. 眼球 triad システムの構成図 [23]

Fig. 1-3 Diagram of the triad system [23].

(2) 眼球自体の運動

視線を右から左、上から下へ移動させると左右の両眼球はほぼ平行して同方向に移動する。このような眼球運動を共同性眼球運動 (conjugate eye movement) と呼ぶが、上下・左右・斜め方向の随意性および反射性眼球運動のほとんどの場合に両眼は平行して移動する。生理的条件下で唯一の例外は、近づいたり遠ざかったりする物体を見る時の眼球運動で、この場合は両眼が反対方向に動き、非共同性眼球運動 (vergence) と呼ばれる。この眼球運動は輻輳および開放運動 (convergence と divergence) に分類される。

生理的眼球運動の種類には大きく分けて、速い眼球運動 (fast or rapid eye movement) と遅い眼球運動 (slow eye movement) に分類される。速い眼球運動は、衝動性眼球運動と前庭性眼振および視運動性眼振の急速相を含んでいる。これらはいずれも注視点を移動させる時に起こる運動で、運動中は視覚が低下している。遅い眼球運動は滑動性眼球運動、前庭性眼振または視運動性眼振の緩徐相を含んでいる。いずれも視標を網膜の中心窩上に固定して外界を動く視標や静止している視標の細部をはっきりと識別する時に働く。これらの遅い眼球運動系も脳幹で一部共通の最終経路へ収束すると考えられている。

以上の生理的眼球運動を分類したものが表 1 - 1 のようになる [24]。

このうち、主要な眼球運動について解説すると以下の様になる。

① 衝動性眼球運動 (saccade eye movement) : 随意的にものを見ようとして注視点を変える時に見られる急速な眼球運動で、1891年にLandoltによって名付けられた。saccadeの特徴は一度運動が起こるとそのsaccadeが終るまで随意的に停止できないことである。運動の速度は眼球の回転角度に依存しており、随意的に調節できない。saccadeの持続時間は振幅に比例して増加する (約 1 msec/度)。最大速度も運動の振幅に比例して増大して 700 度/秒まで達するが、10 ~ 20 度の振幅では 350 ~ 500 度/秒単位である。

② 滑動性眼球運動 (smooth pursuit eye movement) : ゆっくりと移動する視覚対象を目で追跡しているときに起こっている眼球運動で、これに等しい速度で眼

表 1 - 1 . 生理的眼球運動の種類[24]

Table 1. A kind of eye movement[24].

A. 共同性眼球運動	
1) 衝動性眼球運動	saccadic eye movement, saccade
2) 滑動性（追跡性）眼球運動	smooth pursuit eye movement, smooth pursuit
3) 前庭性眼球運動	compensatory eye movement, vestibular-induced eye movement (vestibulo-ocular reflex)
4) 視運動性眼球運動	optokinetic eye movement
B. 非共同性眼球運動	
5) 輻輳性眼球運動	vergent eye movement, vergence

球運動が起こる。速い動きには追従できず、45度／秒までしか滑らかに追うことはできない。それ以上速いとsaccadeになる。

③前庭性眼球運動（vestibulo-ocular reflex）：頭部を回転すると回転と逆方向へ眼球がスムーズに動く。このように、頭部の回転によって内耳半規管に角加速度入力刺激が加わった時に起こる。頭が動いた場合、眼球が頭と一緒に動くとすれば、視線を空間内で一定に保つことができず、物を注視していても網膜上を対象物が動くので、物が揺れて見えてしまう。しかし、実際にはこの反射によって頭部の運動方向と反対方向に眼球が動くので、眼球は頭の回転にかかわらず、もともとと同じ位置にとどまり、正面視を保つことになる。それゆえ、網膜上の映像が動かず、像がぶれることなく、物体を注視できることになる。

この他の運動として、視運動性眼球運動、輻輳性眼球運動がある。

以上のように、眼球運動には多くの種類があったが、大別するとし各対象の探索、選別のためのマクロな運動と、一見無意味に見えるミクロな運動とがある。前者の運動の意味は我々が日常体験するところから自明のことであると考えられるが、後者の方は自覚もなく、科学的にも十分説明ができていないものである[21]。

1. 4 本研究の目的

本研究においては、学習者の眼球運動から、次のことを目的としている。

①学習者の内的な変化、特に精神活動をもたらすアクティビティレベルの変化を観察する。

学習者の注意が向けられる対象物を調べる視点移動と、学習者の興味や情動の変化によるアクティビティレベルの変化、その結果である精神活動を調べるために瞳孔面積変化を測定する。

②学習者のアクティビティレベルの変化を観察し、映像の評価、教育技法の評価に応用する。

瞳孔面積を測定することによって、学習者のアクティビティレベルの変化を観察し、映像、教育技法の評価を行なうことである。

1. 5 本論文の概要

本研究の内容は、次の4つの領域に分けられる。

第1は明るさによる瞳孔変化に関する領域であり、瞳孔が視野内のどの程度の注視範囲の明るさによって変化するかに関する研究である。第2は精神活動による瞳孔変化の領域であり、精神活動と明るさによる瞳孔面積変化と、明るさによる影響の除去に関する研究である。第3は音環境の評価に関する領域であり、音環境による音読速度や瞳孔面積への影響と日頃の習慣などとの関係に関する研究である。第4は視点移動による教育番組の評価に関する領域であり、映像提示中に挿入される文章への注目度についての研究である。

本論文は、以下の8章から構成されるが、第1の領域は3章で、第2の領域は4章と5章で、第3の領域は第6章で、第4の領域は第7章でそれぞれ述べている。

第1章「緒論」では、本研究の目的が先に述べた4つの領域における、明るさの変化や提示パターンとそのパターンに関する課題、音環境を与え、その時の人間の反応を分析し、人間の内的な活動を捉え、教育における測定や評価に適用しようとするものであることを述べている。

第2章「眼球運動とその測定法」では、本論文で使用する、瞳孔面積と視点移動の眼球運動を測定する装置の概要とその測定法について述べている。瞳孔面積は瞳孔を撮影した白黒映像から黒い瞳孔部分とそれ以外の白い部分とに2値化して処理し、テレビ画面の1フレームごとに得る方法で、視点移動の測定はアイカメラからの出力によって視点の位置を得る方法で行ない、評価、分析の方法を述べた上で、パターンの提示方法や実験の条件なども示している。

第3章「輝度と瞳孔面積の関係」では、瞳孔面積の大きさがどれだけの領域の輝度によって決まるかを検討する。明領域と暗領域からなり、その空間周波数が $0.056 \sim 0.301 \text{c/deg}$ のパターンを提示して、瞳孔面積を測定した時、提示パターンの平均輝度が 26cd/m^2 と暗い時には視野角が約3度、 119cd/m^2 と明るくなると視野角が約9度の領域の輝度によって瞳孔面積が変化するなど、瞳孔面積を変化させる視野角が全視野の平均輝度にも関係することを明らかにしている。また、明、暗領域へ注視する時間を変化させると、注視する時間が2秒以上では瞳孔面積は変化するが、1秒以下になると変化しないことを述べている。

第4章「音声による課題を与えた時の瞳孔面積変化」では、精神活動中の瞳孔面積がどのような変化をするかについて論じている。パターン提示中に、そのパターンに関する音声による課題を与え、課題について思考させることによって瞳孔面積が約30%増大することを示している。また、意味のないパターンの提示中でも課題を与えることによって、瞳孔面積が約10%増大するため、課題に対して考えるという精神活動そのものが、瞳孔を変化させていることを示している。

第5章「瞳孔面積変化からの輝度の影響の分離」では瞳孔面積を変化させる要因である、精神活動と輝度の2つの要因について調べ、精神活動による変化だけを抽出する方法について論じている。すなわち、パターンを提示中に課題を与えると、2つの要因によって変化するが、両者はそれぞれ独立に瞳孔面積を変化させることを分散分析の結果から明らかにしている。また、輝度による要因を取り除き、精神活動の要因だけに基づく瞳孔面積変化を抽出する方法を示し、興味だけによる提示パターンの評価を行なっている。

第6章「音環境が与える音読速度への影響と瞳孔面積変化」では、無音、BGM、CM音、雑音の4つの音環境で、平仮名文を音読する速度とその時の瞳孔面積を調べて、音環境の評価を行ない、4つの環境では無音の音環境で両者とも最大となり、音がある環境で低下することを示している。また、被験者の日頃の生活習慣との関係を調べたところ、音楽を好んで聞いている被験者はBGMが流れても、音読速度はあまり低下しないが、BGMに慣れていない被験者は大きく低下し、これとは逆に、テレビをよく見ている被験者はCM音によって大きな影響を受けること、音圧レベルの影響について、BGMはレベルを高くしても、音読速度はあまり変化しないが、雑音の場合には大きく低下することを示している。

第7章「動画と静止画に対する文字スーパーへの視点移動の違い」では、動画と静止画にスーパーインポーズした解説文章の読み方を視点移動から調べて検討している。解説文章を読み切る時間を測定したところ、背景の映像が動くとき映像を見ながら読むため、動画では静止画よりも約14%読み切る時間がかかることがわかり、解説文章に視点が留まる時間は静止画の方が約4%高いことを示している。

第8章「結論」では、第1章から第7章までに得られた結論を総括し、今後の研究課題について考察している。

以上の本論文の構成を図1-4に示す。

本研究内容のフローチャート

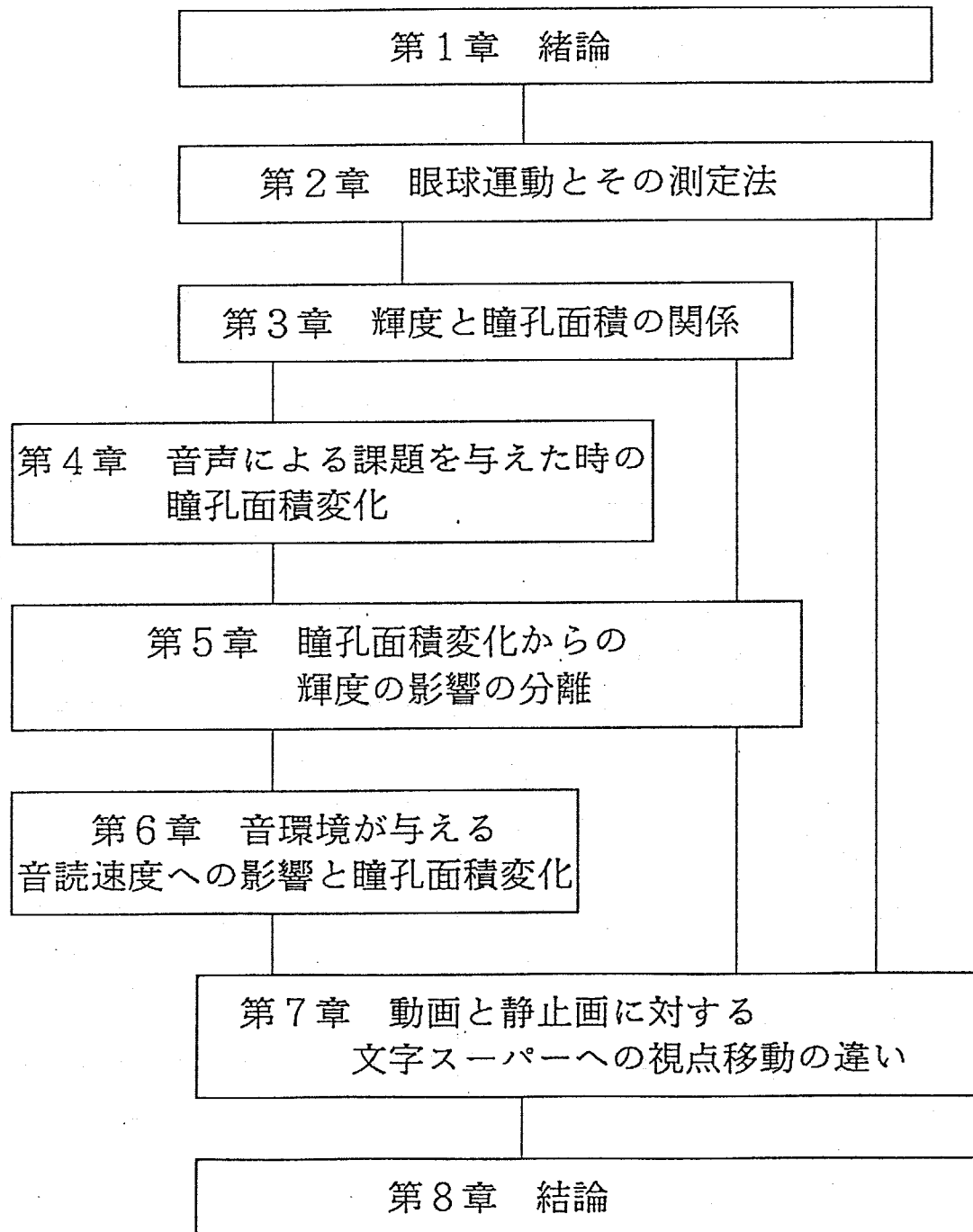


図1-4. 本研究内容のフローチャート

Fig. 1-4 Flow chart of the contents in this paper.

第 2 章

眼球運動とその測定法

2. 1 まえがき

本章では眼球運動、本論文で用いた瞳孔面積と視点移動の測定装置、および測定法とその分析法について述べる。測定はアイマークレコーダを被験者に装着させ、瞳孔の映像と視点の映像を取り出すことができる。それらの映像を用いることによって瞳孔面積と視点移動の位置を得ることができる。

眼球運動については、第 1 章の歴史的背景でものべたように、古くから関心を持たれ、研究されていたが、測定法や測定技術が確立されなかったために、正確な測定が困難であった。瞳孔反応の測定では、暗箱に顔を固定し、刺激パターンに反応した瞳孔を写真やフィルムで撮影し、その直径を測定し、データ化したり、視点移動についても、刺激映像と注視点データを重ね合わせ、集計を行ったりと、測定は容易ではなかった。

今日、電子計測技術の発達に伴い、測定技術の問題は解決されつつあり、眼球運動のデータ化は、自動化されるようになり、比較的容易になってきた。しかし、被験者の負担や長時間の測定では装置がずれるなどの測定上の制約が、解決されなければならない点である。

2. 2 ではまず、実験に使用したアイカメラについて解説し、本研究における典型的な実験の形態を示す。さらに 2. 3 で瞳孔面積測定装置と視点移動分析装置について解説する。

2. 2 アイカメラ

本研究ではアイカメラとして、ナック社製のアイマークレコーダ V 型を使用し

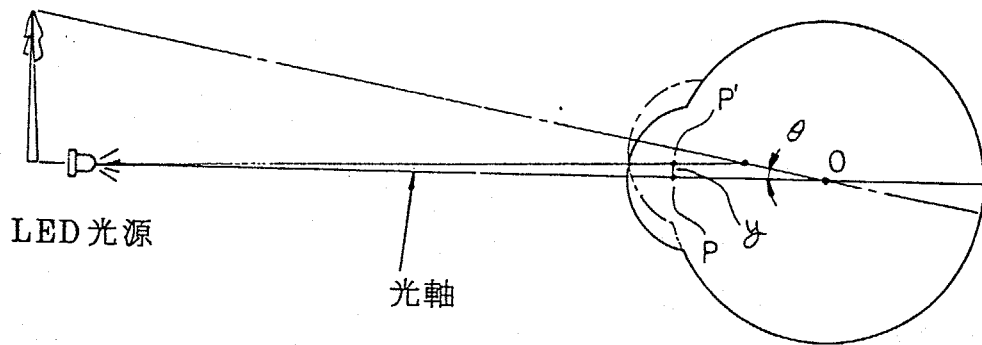


図 2 - 1 . 視点検出の原理 [25]

Fig. 2-1 A mechanism of detecting gaizing point [25].

た。このアイカメラは、角膜からの反射光を調べて視線を調べる方式のもので、その原理を図 2 - 1 に示す [25]。角膜に LED の光を当てると角膜で反射する。反射する点、すなわち光源の虚像の結像点 P は眼球が O 点を中心に角度 θ だけ回転すると、P' に結像点が移動する。この視点の回転によって得られた光源虚像点の移動量 PP' が、視野の物体間の距離に等しくなるように撮影倍率を合せると、見ている物体と虚像点とを一致させることができる。これをアイマークと呼ぶことにする。アイマークレコーダモデル V ではアイマーク像と視野映像を別々のカメラで撮影し、合成した後出力される。

アイマークレコーダの構成を図 2 - 2 に示す。図からわかるように、被験者に装着させる撮影ユニットとカメラコントローラで構成されている。

撮影ユニットは、ゴーグル状で白黒の視野カメラを付けた視野撮影ユニットと左右の目の動きをとらえるための撮影ユニットからなっており、左右の目の動きを独立に測定することができる。さらに同様の撮影ユニットで、瞳孔測定用のためのユニットも用意されている。この瞳孔撮影ユニットは眼全体の映像を撮影するものである。

カメラコントローラは、視野カメラ、両眼の撮影カメラの 3 つの映像の入力を持ち、視野カメラの映像にアイマーク像を合成するためのものであり、撮影倍率

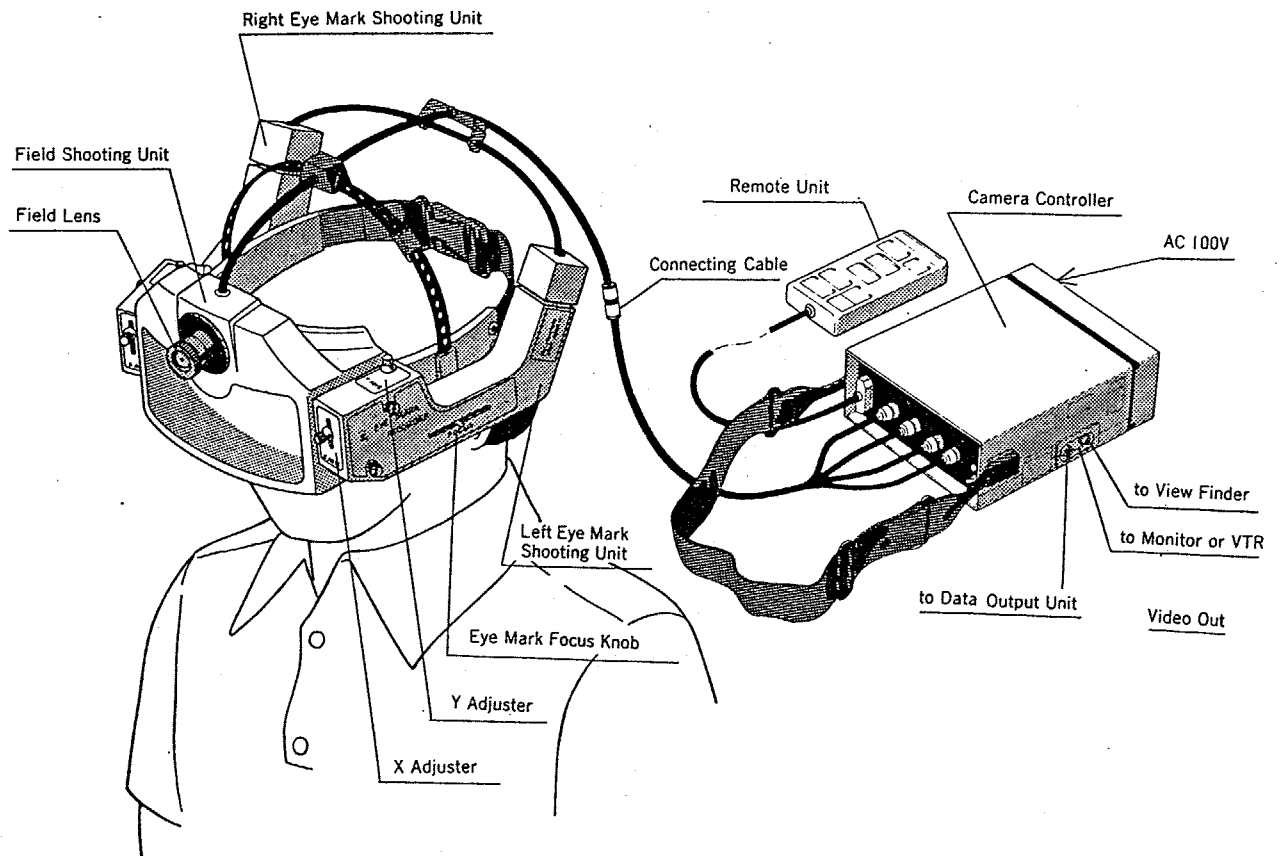


図 2 - 2 . アイマークレコーダモデル V の構成

Fig. 2-2 The equipment 'EYE MARK RECORDER MODEL V'

を調節することによって物体とアイマーク像を合成することができる。また、出力は 2 系統あるので、視野映像にアイマークを合成した映像と、瞳孔面積測定のために眼の映像を同時に出力することもできる。

ところで、人間の視野については図 2 - 3 に示すように視野角が測定されており[26]、両眼で同時に見ることができる領域はかなり大きい。また、第 1 章でも述べたように、両眼は共同性眼球運動[24]を行なうため、両眼は平行して移動する。このことから視点移動を片眼だけで測定することも可能であると考えられる。そこで、本研究では、右側の眼球では視点移動を測定し、左側の眼球では瞳孔面積を測定することとした。先に示したように、このアイマークレコーダでは 2 系統の出力を持つので、視野映像にアイマークを合成したアイマーク映像と眼球の

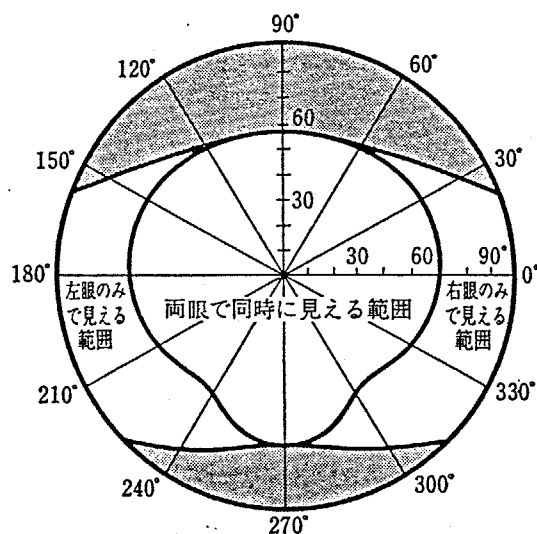


図 2 - 3 . 視野 [26]

Fig. 2-3 Visual field. [26]

映像を出力させてそれぞれを評価することとした。本研究における典型的な実験の形態を図 2 - 4 に示す。すなわち、あらかじめ制作し、ビデオテープに収録したパターンを 37 型のビデオモニターで再生し、本アイマークレコーダを装着した被験者に提示する。アイマークレコーダから出力される被験者のアイマーク映像と眼球の映像をタイムコードで同期させた 2 台の V T R で同時記録し、実験後コンピュータによって分析し、視点の位置と瞳孔面積値を得た。

頭部に装着する部分は、重量が約 700 g であるため、頭部を自由に動かすことができる。しかし、ゴーグル型であるため、頻繁に大きく動いた場合には、ゴーグルがずれるので、視点の位置がずれる。実験中に視点の位置がずれても、修正することは難しい。ゴーグルは下方は開放されているものの、機密性も高く、汗などをかくと、ゴーグル内のミラーがくもるため、視点移動も、瞳孔用の眼球の映像も撮影不能となるため、室温や被験者の状態に留意することも必要である。

Video monitor(37 inch)

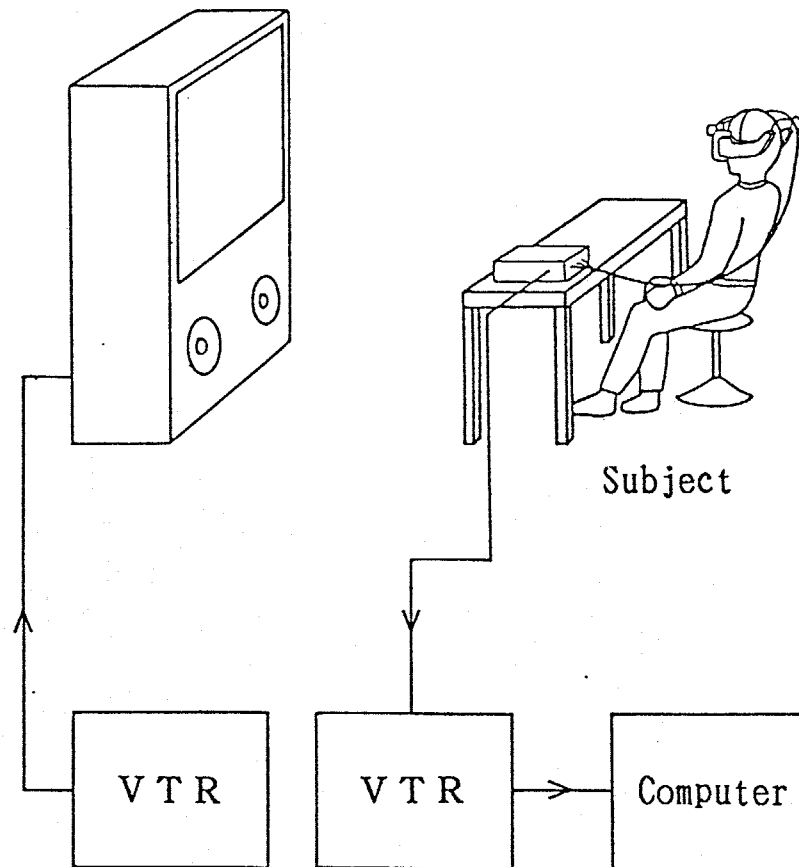


図 2 - 4 . 典型的な実験の形態

Fig. 2-4 Typical setup of experiment.

また、軽量とは言っても長時間の使用は不可能で、経験的に連続15～20分が目安と考えられる。

2.3 測定システム

2.3.1 瞳孔面積の測定

本研究に使用したシステムは前節で述べたアイマークレコーダであり、一方の眼球運動から視線を調べ、他方の眼球の瞳孔面積を計測するようになっている。瞳孔撮影する瞳孔撮影ユニット部分は、小型のMOS型個体撮像素子によって瞳孔を撮影し、そのテレビ画像から瞳孔の黒い部分の面積を測定した。そこで、ここでは光学系と電子回路系に分けて、装置の概要を説明する[13]。

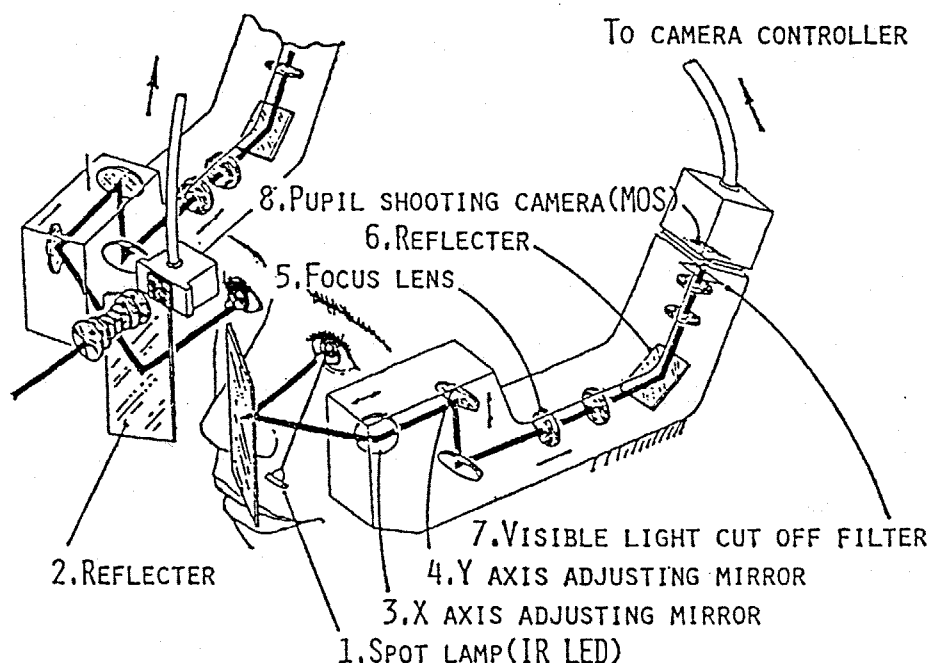


図2-5. 瞳孔撮影の光学系

Fig. 2-5 Optical path of the equipment

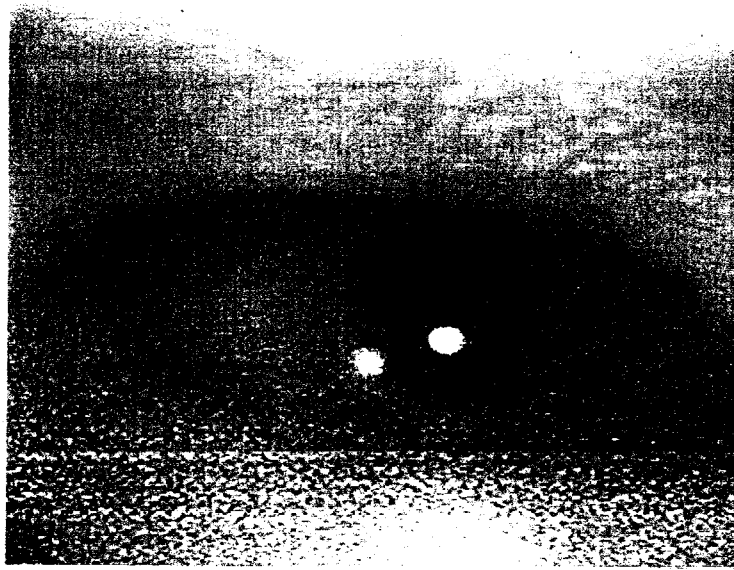


図 2 - 6 . 瞳孔のテレビ映像

Fig. 2-6 Pupil image caught by the equipment
for measuring pupil size.

(1) 瞳孔撮影の光学系

図 2 - 5 は瞳孔の映像を撮影するための光路を示す図である。図において瞳孔部照明光源 1 によって照らした眼球の映像は反射ミラー 2 によって反射され、さらに二つのミラー 3、4 によって反射された後、ピント調整レンズ 5 を通り、ミラー 6 で光軸が曲げられた後、可視光カットオフフィルタ 7 を通り、瞳孔撮影カメラ 8 によって撮影する。ここで X 軸調整ミラー 3 および Y 軸調整ミラー 4 は、瞳孔部を画面内の中央に位置するように微調整するものであり、ユニットの外部から微調整可能で、測定ごとに調節する必要がある。

このような光学系によって撮影した眼球の映像を図 2 - 6 に示す。この図において中央の黒い部分が瞳孔であり、その周囲の薄い灰色の瞳孔の中の小さな白い部分は照明光源のスポットである。このスポットの存在は瞳孔面積をデジタル信号として自動測定する際に好ましいことではないので、スポットを自動除去す

ることやスポットの位置を位置を画面の周辺にすることについて種々検討したが容易ではなかった。そこで、ここでは、この影響を後述する方法によって瞳孔面積を評価するときに考慮することにした。

ところで、図 2-5 における反射ミラー 2 は眼球の映像を反射させるものであるが、被検者はこのミラーを通して視野を見る必要がある。そこで、この反射ミラーは多層膜コーティングを施したもので、近赤外線領域の光を 90% 以上反射し、可視光領域は透過する特性をもっているものを用いた。ここで、瞳孔部照明用の光源は、発光出力が約 16 mW の GaAs 赤外発光ダイオードで、その発光スペクトラムは約 950 nm にピークをもたせた。したがって、発光ダイオードで照明された眼球の映像はほぼ完全に反射され、瞳孔ユニット部の方へその光を導いている。また、反射ミラー 6 は、近赤外線光の反射率を高めるために金メッキミラーを採用している。さらに、瞳孔撮影カメラ直前の可視光カットオフフィルタは、眼球から反射される不必要な可視光を取り除くためのフィルタである。

瞳孔撮影カメラには、MOS 型 2/3 インチ個体撮像素子を用い、その走査面積は 8.8×6.6 mm、画素数は 320×244 ドットである。この分光感度特性は、照明光源と同様に近赤外領域にピークをもつ特性である。これらの結果、照明がそれほど強くないにもかかわらず、比較的鮮明な瞳孔部の画像を撮影できることが本光学系の特徴である。

また図 2-2 のように、左右の目の前面にゴーグルフィルタがあるが、このフィルタの素材であるポリカーボネート材の表面には、外部からの近赤外光をカットして瞳孔をよりよく撮影するための多層膜コーティングを施してある。

以上説明した瞳孔撮影ユニットの特徴を列挙すると次のようになる。

- ① 頭部に装着する部分の重量が約 700 g と軽いため、被検者はあまり違和感なく頭部を自由に動かすことができる。
- ② 実験する場所の明るさにかかわらず使用できる。
- ③ 照明電源として目に見えない近赤外光を使用しているので、被検者の負担影響が少ない。
- ④ 瞳孔の映像を捕らえる反射鏡には、近赤外光のみを反射する透明ミラーを使用しているので、被検者前方の視野を遮るものはない。

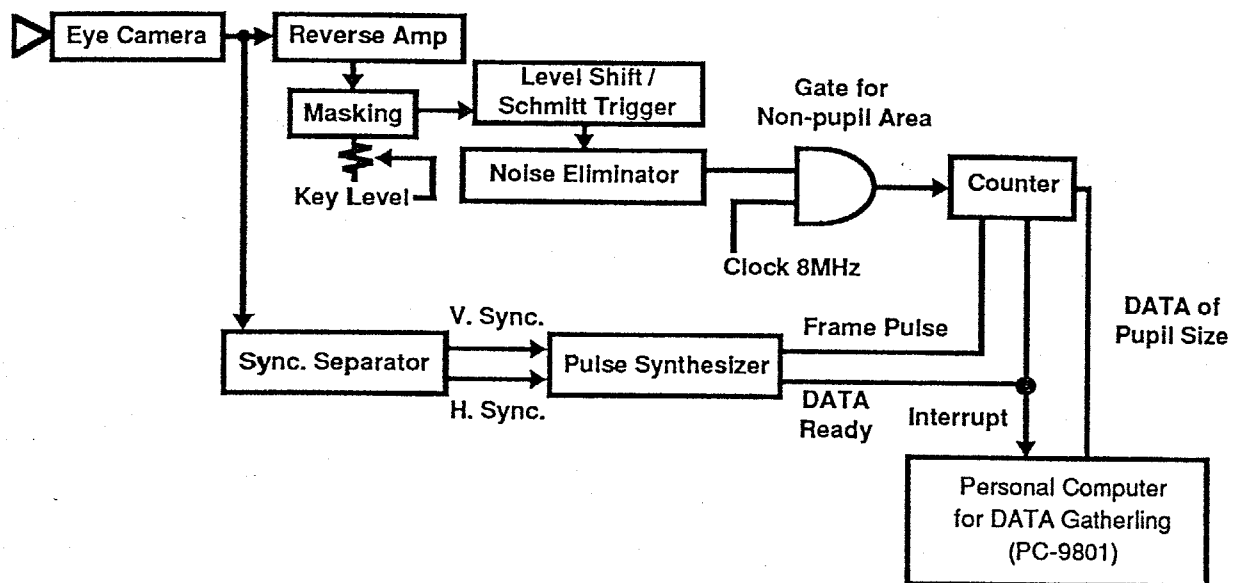


図 2 - 7 . 瞳孔計測の電子回路ブロック図

Fig. 2-7 Block diagram of electronic circuit

for measuring pupil size.

(2) 瞳孔面積計測の電子回路

ここでは前節の光学系によって撮影した瞳孔のビデオ信号から、一画面ごとの瞳孔面積（黒い部分）を計測する方法について述べる。テレビ画像の信号は連続しているので、同期信号によって区切ることによって、リアルタイムに瞳孔面積を求めることができる。ここで測定装置の電子回路のブロック図を図 2 - 7 に示す。この図において瞳孔面積測定装置の概要を説明すると次のようになる。

① 白黒反転

本測定装置では瞳孔の黒い部分を計測することになるが、テレビ信号では水平・垂直信号や色同期信号等が黒いレベル側にある。この状態で、あるスレッシュホールド以上の信号を黒と判断すると、各種の同期信号を瞳孔部分と同時に取り込んでしまい都合がわるい。そこでまず白黒反転を行った。

② マスキング

瞳孔を撮影した画像には、照明や目の凹みのために画面の隅に黒い部分が生ずる。これは瞳孔面積として加算されてしまうので、瞳孔面積部分だけを白く（白黒反転しているので）抜くマスキングの操作を行った。この場合、ビデオ画像上

の瞳孔の明るさが被検者や照明の違いによって異なるため、キーレベルを変えてマスキングを行う明るさを調節した。

③ デジタル化

瞳孔部分だけが白く、地が黒くなったビデオ信号（アナログ信号）をレベルシフトおよびシュミットトリガ回路を通してデジタル信号とした。これによって瞳孔以外の部分が高レベルとなり、目的とするデジタル信号が容易に得られるようになった。

④ ノイズ除去

二値化したデジタル信号は、雑音から生じたインパルスの不用な信号を含んでおり、1回のパルスであるべき所を2回あるいは3回と計測してしまう場合がある。そこで、ある時間内に次のパルスが立ち上がった場合は連続な信号となるように補正し、ノイズ除去を行った。

⑤ 非瞳孔ゲート・カウンタ

白黒反転した結果、白で表現される瞳孔以外の黒い部分を計測するために、非瞳孔ゲートにクロック周波数 8 MHz を加え、そのクロックを計測することによって瞳孔以外の総面積を求めた。ここで 8 MHz を使用すると水平方向の分解能は約 400 ドットとなり、今回の目的のためには十分な細かさである。しかも、テレビ信号の縦方向の走査線数が 262.5 本であることから、縦横のドットの数でテレビのアスペクト比の 3 : 4 にほぼひとしく、撮影した瞳孔の形はあまり変形しない。

⑥ データ収録と処理

データの収録にはパーソナルコンピュータ・PC-9801 を用いた。コンピュータには新しいデータが揃う 1 / 30 秒ごとに割りこみが入る。そして、割りこみ処理ソフトウェアによってカウンタの内容すなわち非瞳孔部分の面積を読み込んだ後、画面全体の面積からこの値を減算して、瞳孔部分だけの面積を求め、メモリ上に順次記憶して行くように構成した。

以上のような方法でコンピュータには 1 / 30 秒ごとに、リアルタイムで瞳孔面積のデータが収集できた。ところで、図 2-6 に示すように撮影した瞳孔のテレビ画像には、その中心に照明スポットがある。しかし、実験によれば、正面の提示パターンを見ている間はいつもスポットは瞳孔内に存在し、しかもその面積

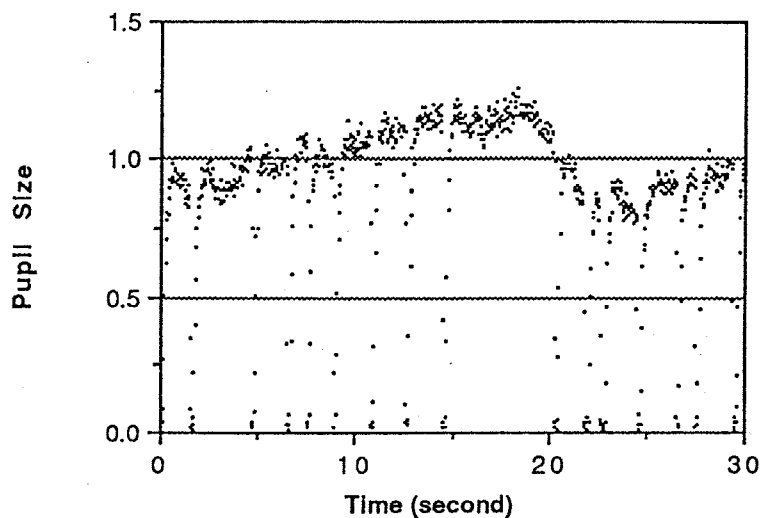


図 2 - 8 . 瞳孔面積の時間的な変化

Fig. 2-8 Pupillary changes in 30 sec.

はほとんど一定であるので、上記の方法によって計測した瞳孔面積にこのスポット分を加えることによって、瞳孔面積とした。

(3) 瞳孔面積の評価法

瞳孔面積測定装置で瞳孔面積を測定した瞳孔面積の時間的な変化の一例を図 2 - 8 に示す。この結果はパターンを 30 秒間提示した時の結果で、テレビ画面 1 フレーム (1 / 30 秒) ごとの瞳孔面積をプロットしたものである。この図において瞳孔の大きさが急激に小さくなっている部分があるが、これは瞬きによるものである。瞬きの際のデータは自動的に取り除いた。図からわかるように、30 秒間の提示においても瞳孔面積は微妙に変化している。そこで各提示パターンに対する瞳孔面積は提示時間中の平均で表わすことにした。さらに、瞳孔そのものの大きさが各個人によって異なるので、各被験者ごとに全体の平均瞳孔面積をもとめ、その平均値を 1.0 として規格化した。この規格化した瞳孔面積の値を相対瞳孔面積と定義し、本論文ではこの値で、瞳孔面積を評価した。

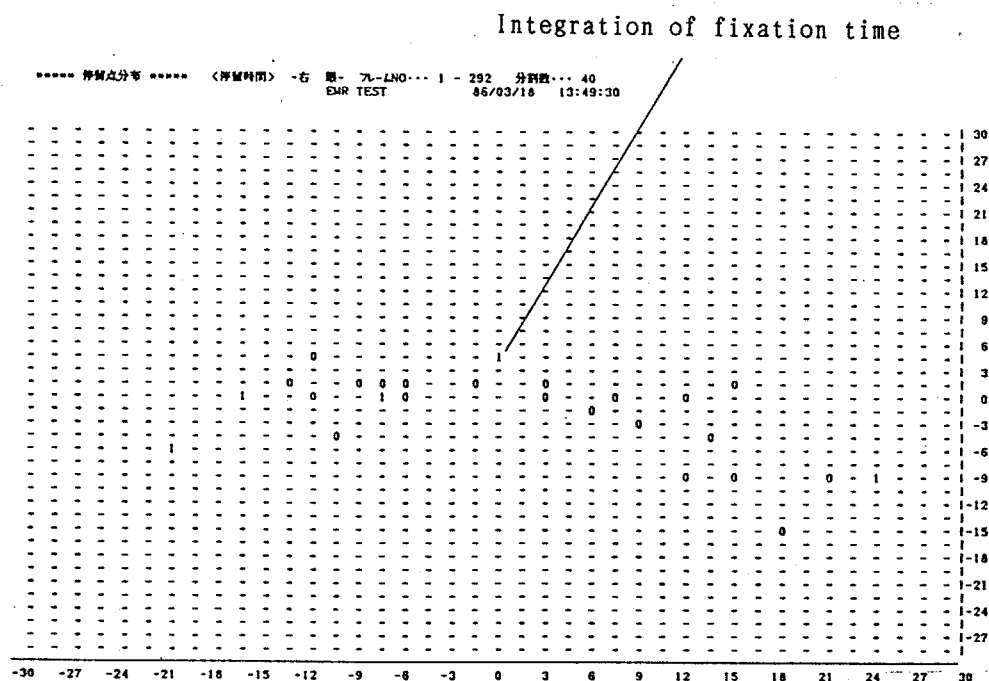


図 2 - 9 . 停留時間の積算例 [27]

Fig. 2-9 A sample for integration table
of fixation time[27].

また、瞳孔面積の測定値はパーソナルコンピュータのRAM上にストアした後、フロッピーディスクに移す関係で、無限長の時間に対して、連続的には測定できない。そこで、前節で述べたように、ビデオテープに一度瞳孔の映像と絶対時間を示すタイムコードを記録し、実験後タイムコードを使って、任意のパターンに対する部分の瞳孔面積を測定するようにした。

2.3.2 視点移動の測定

本論文で使用したアイマークレコードモデルVでは、アイマークのX, Y座標値は映像信号と共に出力されている。この座標値は専用のデータ出力ユニットを用いることによって、パーソナルコンピュータに出力可能であり、視点移動を数値化し、分析することが可能である。なお、この座標データは、1フレームごと

の視点の位置であり、専用の解析ソフトウェアを用いることによって任意のフレーム間で、次のような分析が行なえる[27]。

- ① アイマークデータリストの出力、
- ② アイマーク軌跡の出力、
- ③ 停留点リストの出力、
- ④ 停留点軌跡の出力、
- ⑤ 停留点分布の出力、
- ⑥ 停留点時間頻度の出力、
- ⑦ 移動ベクトルの方向分布の出力、
- ⑧ 移動速度の分布の出力

本論文では、この内②と⑥を分析に用いた。②では視点移動の軌跡を得ることができ、提示パターン中のどこを見ていたかを知ることができる。⑥の分析の一例を図2-8に示す。図の様に視野を視野角度によって分割し、その各位値に停留した時間を積算した結果を得ることができる。なお、このソフトウェアでは1秒の精度までしか出力されなかったもので、プログラムを一部修正し、0.1秒の精度まで出力可能なように修正し、測定に用いた。

2. 4 まとめ

本章では、本論文で眼球運動の測定に用いたアイマークレコーダ、および瞳孔面積、視点移動測定装置について述べた。また、アイマークレコーダを使うことによる実験の条件として、片眼づつ、視点移動の映像と瞳孔測定用の映像を同期させた2台のVTRで記録し、実験後、それぞれについて分析を行なうことを示した。さらに実験の総時間や被験者の状態などについても目安を示した。

瞳孔面積の評価については、被験者による瞳孔そのものの大きさが異なる点を考慮して、各被験者ごとに平均値で規格化した相対瞳孔面積で評価することを示した。視点移動についても、視点の座標値で評価できることを示した。

第 3 章

輝度と瞳孔面積の関係

3. 1 まえがき

本章では瞳孔反射であり、瞳孔面積を大きく変化させる明るさについて検討し、提示するパターンの輝度の評価方法を検討するとともに、実験におけるパターンの提示条件についても調べる。

ところで、明るさの知覚に関しては十分な検討がなされ、目の感度が波長によって変ることを示した比視感度曲線（波長の関数としての視感度）を国際照明委員会で決め、それに基づいて種々の測光量が定義づけられている。

人間が感じる明るさに比較的対応している測光量は輝度 (luminance) である。輝度はある面（面光源、反射面、透過面）をその際の観測方面から見た際の見かけの単位面積（観測方向に垂直な面に投射した面積における単位面積）当りの光度をいう。そして光度とは、光源からある方向に発散される光の強度であり、微小な波長幅について、毎秒発散する放射エネルギーに視感度を乗じて、可視範囲内で積分したものに相当する。輝度の標準的な単位は cd/m^2 であり、本研究においては、明るさは輝度 (cd/m^2) によって表わすものとする。

しかし、輝度が等しくても知覚される明るさは等しくない。輝度は単位時間、単位面積あたりの光度であるが、知覚される明るさは、刺激光の提示時間や面積によっても変るとされる [20]。

一方、瞳孔の輝度変化による変化量はいくつか示されている。その例を図 3-1 [13]、3-2 [28] に示すが、輝度の測定条件や提示条件が明らかでないため、提示物の輝度と瞳孔面積の変化は明確には示されていない。先に示した知覚の研究においては、刺激光の提示時間や面積によって知覚される明るさが変わるとされていることから、瞳孔面積についても同様であると考えられる。すなわち、提示物の大きさ（面積）や提示物への注視時間と輝度は、瞳孔面積を変化させる要因

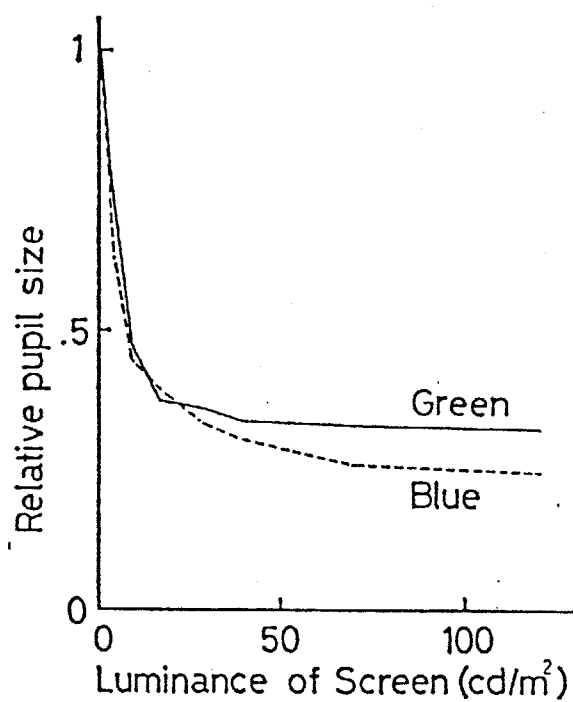


図 3 - 1 . 明るさに対する瞳孔面積変化の結果[13]

Fig. 3-1 Pupillary changes correspond to luminance changes[13].

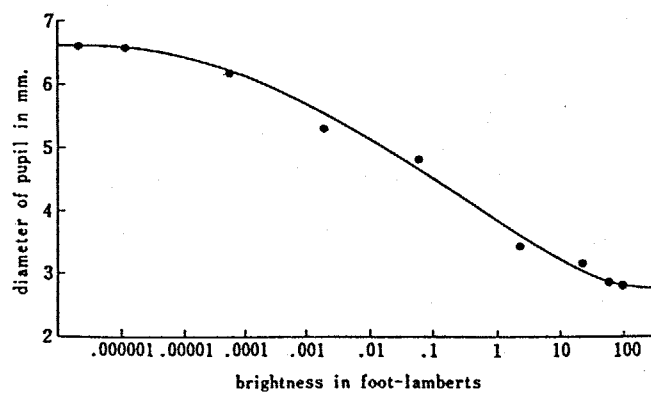


図 3 - 2 . 明るさに対する瞳孔面積変化の結果[28]

Fig. 3-2 Pupillary changes correspond to luminance changes[28].

であると考えられ、それらの基本的な特性は、瞳孔面積によって評価しようとする提示パターンの制作や実験に重要である。

そこで本実験では以下のことを目的とした。

- ① 視野内全体の輝度によって瞳孔面積はどのように変化するか。
- ② 注視する領域の大きさと輝度によって瞳孔面積はどのように変化するか。
- ③ 明、暗領域への注視時間を変化させると瞳孔面積はどのように変化するか。

以上の点について検討することとした。

そのため、提示パターン全体では輝度が一定で、注視する領域によって輝度が異なる種々のパターンを、瞳孔面積測定装置を付けた被験者に提示して、実験を行なった。

3. 2 実験方法

3.2.1 提示パターン

部分的な明るさの違いによる瞳孔面積の変化を調べるためのパターンとして、明るさの対比実験で用いられる明領域と暗領域が交互に並んだ格子縞のパターンを用いた。このパターンでは、明領域と暗領域の大きさが変化しても、それぞれの領域の数が一致していれば領域の大きさにかかわらず、提示パターン全体の明るさは一定に保つことが可能である。

提示パターンは 80×80 cm の黒のラシャ紙に帯状にした白のケント紙を貼りつけ、白い部分と黒い部分が同面積となるような格子縞を制作した。パターンの例を図 3-3 に示す。格子の数は 6 段階に変化させ、それぞれに対応するパターンを制作した。これらの格子縞のパターンについては、明領域と暗領域の繰返しの数と、被験者から見た視野角を使い、パターンの空間周波数で縞の細かさを表わす。本実験では、後で述べるように、このパターンから 80 cm 離れた所に被験者を置き、実験したので、それぞれのパターンの空間周波数は表 3-1 に示すようになる。なお、ここでは白と黒の繰返し 1 組を 1 サイクルとしている。

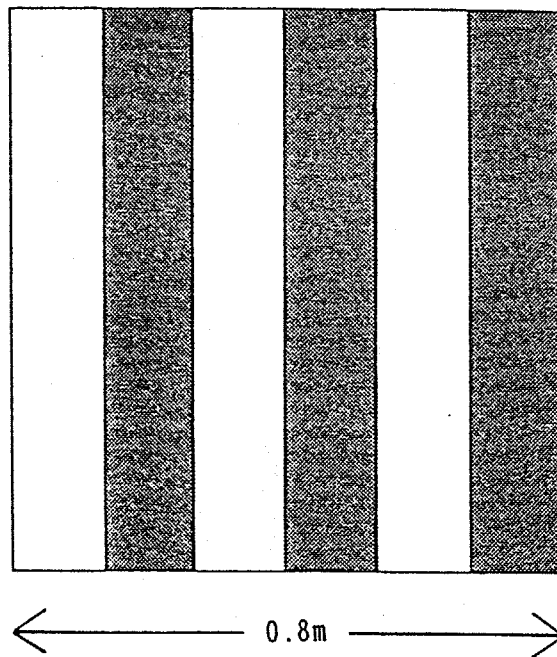


図 3 - 3 . 提示パターン

Fig. 3-3 Visual pattern.

3.2.2 提示方法

パターンの提示は、大山による明るさの対比実験[20]に準じることにした。すなわち、まわりの明るさの影響を避けるために、開放された背後の位置に黒ビロードの暗幕をはり、暗黒の背景をつくり、その50 cm前に黒紙を貼って暗黒とした提示版を置き、その提示版上でパターンを順番に提示した。実験の形態を図3-4に示す。

予備実験の結果、領域の視野角が大きい場合は、眼球や頭部を回転させてその領域を注視するために、眼球の変位によって、眼の両端に眼球が偏るため、被験者によっては瞳孔面積の測定精度が多少低下することがわかった。これは、前庭性眼球運動[24]によるため、頭部を注視領域に向けるため、眼球はその反対方向に回転するからである。この結果から、被験者の視点が1点を注視するようにし、パターン全体の明るさと注視領域の大きさを変化させることにした。そこで、

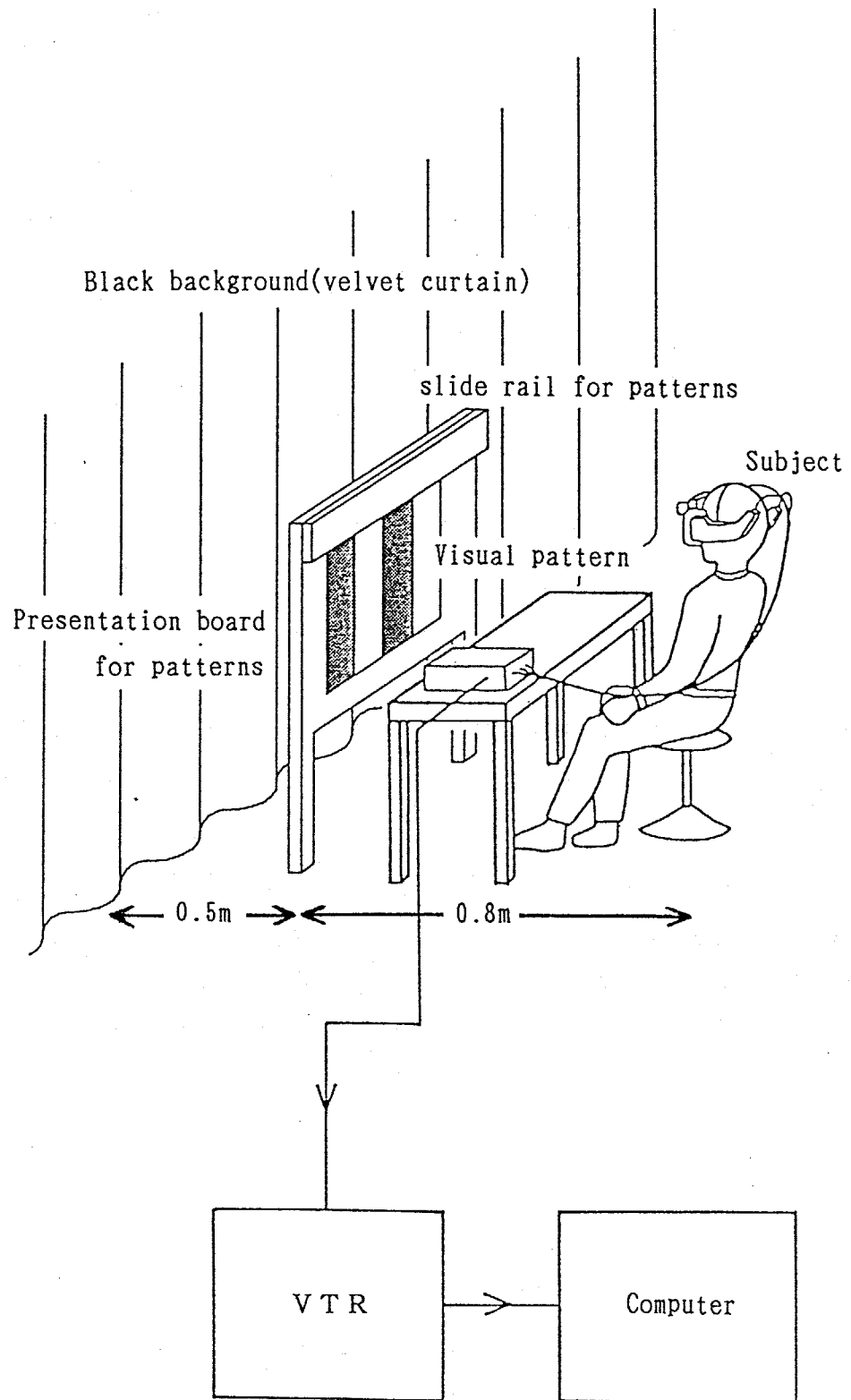


図 3 - 4 . 実験の形態

Fig. 3-4 Diagram of experimental setup.

提示版中央で上下に赤い糸をはり、その中央部に結び目を作り、被験者の注視点を固定させた。そして、提示パターンをカーテンレールで吊るして、移動が容易な状態とし、タイマーを用いて注視時間ごとに、パターンを左右に移動させ、目的の領域が、被験者の注視領域となるようにした。この提示パターンにハロゲン系のランプ2灯で照明し、スライダックで電圧を変化させてパターン全体の輝度を3段階に変化させた。各パターンとも明領域、暗領域が50%ずつであるので、パターン全体の輝度は明領域と暗領域の輝度の平均であると考えることができる。ここではこの平均値をパターンの平均輝度と定義する。実験を行なった3段階での平均輝度を以下に示す。

26 cd/m² (明領域 = 48 cd/m²、暗領域 = 4 cd/m²)

71 cd/m² (明領域 = 133 cd/m²、暗領域 = 9 cd/m²)

119 cd/m² (明領域 = 223 cd/m²、暗領域 = 15 cd/m²)

この提示版から80 cm離れた所に瞳孔面積測定装置を付けた被験者を置き、注視点と、瞳孔の映像をタイムコードで同期させた2台のVTRで記録して、分析した。

尚、1つの領域への注視時間は10秒で、明領域と暗領域それぞれ10回ずつ、計20回提示を行なった。分析の際、全てのパターンについて、提示開始から2回分の結果を削除し、注視領域が変わった直後の3秒間を除いて集計を行なったため、各領域を7秒間注視した結果を評価したことになる。

3.3 実験結果

3.3.1 空間周波数との関係

空間周波数が増えることによって、瞳孔面積がどのように変化するかを調べた。3つの平均輝度について、各パターンでの明領域と暗領域の瞳孔面積を集計した。集計した結果を表3-1に示す。この表での瞳孔面積は、各パターンごとに測定した瞳孔面積全体の平均値を1.0として規格化した値を用いている。こ

		平均輝度					
		26cd/m ²		71cd/m ²		119cd/m ²	
		明領域	暗領域	明領域	暗領域	明領域	暗領域
		48cd/m ²	4cd/m ²	133cd/m ²	9cd/m ²	223cd/m ²	15cd/m ²
空間周波数	0.056	0.93	1.07	0.93	1.07	0.90	1.04
	0.075	0.92	1.05	0.94	1.02	0.96	1.00
	0.113	0.93	1.05	0.93	0.99	0.95	0.99
	0.151	0.96	1.03	0.95	1.01	0.97	0.99
	0.226	0.98	1.02	0.94	0.98	0.95	0.98
(c/deg)	0.301	0.98	1.01	0.97	0.97	0.97	0.97

表3-1. 各パターンの空間周波数と明、暗領域における相対瞳孔面積

Table 3-1. Spatial frequency of patterns and relative pupil size
on bright and dark area.

の値を相対瞳孔面積と定義する。

いずれの平均輝度での結果においても、空間周波数の低いパターンでは明領域と暗領域の相対瞳孔面積の差が大きく、空間周波数が高くなるにしたがって、相対瞳孔面積の差が小さくなっている。空間周波数による瞳孔の変化量を調べるため、暗領域の相対瞳孔面積値から明領域の相対瞳孔面積値を差引いた値とパターンの空間周波数との関係を図3-5に示す。図中の線はそれぞれパターンの平均輝度、 26 cd/m^2 （実線）、 71 cd/m^2 （点線）、 119 cd/m^2 （鎖線）での結果を示している。図からわかるように、パターンの平均輝度によって、明領域と暗領域の瞳孔面積の差の縮まり方に違いがある。 26 cd/m^2 （実線）での結果を見ると、空間周波数が高くなっても瞳孔面積差はゆっくりと小さくなっている。これに対して 119 cd/m^2 での結果は空間周波数の低い領域で瞳孔面

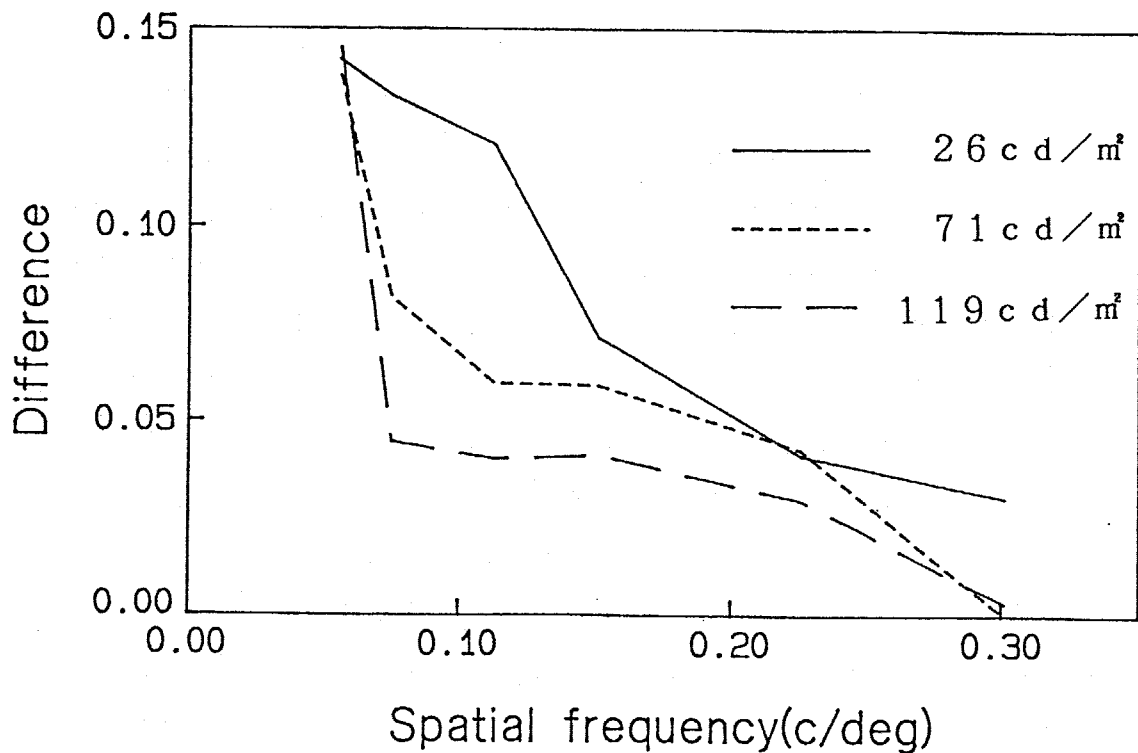


図3-5. パターンの空間周波数と明、暗領域での相対瞳孔面積差との関係

Fig. 3-5 Relations of spatial frequency and pupil size difference between gazing point fixed to bright and dark area.

積差が急激に小さくなり、その後はほぼ同じ値となっている。また、空間周波数 0.3 での 71 cd/m^2 (点線) と 119 cd/m^2 (鎖線) の値がほぼ一致していることから、 71 cd/m^2 以上の輝度では、明領域と暗領域の瞳孔面積には差がないことがわかる。以上のことから、パターンの平均輝度と空間周波数は瞳孔面積を変化させていることがわかった。

3.3.2 視野角との関係

前節では、パターン全体の空間周波数との関係を調べた。本節では明、暗領域それぞれの大きさによって瞳孔面積が変化するかを調べた。いずれのパターンにおいても明領域と暗領域の大きさは同じである。それぞれを注視した時の瞳孔面積に差があれば、その大きさの領域の輝度によって瞳孔面積が決ることになる。ここではその領域の大きさを視野角で表現し、まとめることにした。領域の輝度による瞳孔面積の変化を判断するために、明領域、暗領域を見ている時の相対瞳孔面積値について t 検定を行なって判定した。すなわち、有意な差が得られた場合は、その視野角のそれぞれの領域の輝度によって瞳孔面積が変化した結果である。輝度と視野角ごとの t 検定の結果を図 3-6 に示す。

図中○印は 1%水準で、□印は 5%水準で有意な差があったことを示し、×印は有意な差がなかったことを意味する。図からわかるように、パターンの平均輝度が 26 cd/m^2 と暗い時には、視野角が約 3 度の領域の輝度によって瞳孔面積が変化していることがわかる。逆にパターンの平均輝度が 119 cd/m^2 と明るくなると視野角が約 9 度と 3 倍の領域の輝度で瞳孔面積が変化している。この結果は従来から瞳孔面積は明るさによって変化するとされてきたが、視野内の明るさと注視する領域の明るさやその大きさによっても変化することを示している。

さらに、瞳孔面積を変化させる領域の大きさを示すため、5%水準の有意差が得られるおおよその境界を図中に点線で示した。すなわち、この点線より上側の部分に入る場合はその領域の輝度によって瞳孔面積が変化することを意味する。

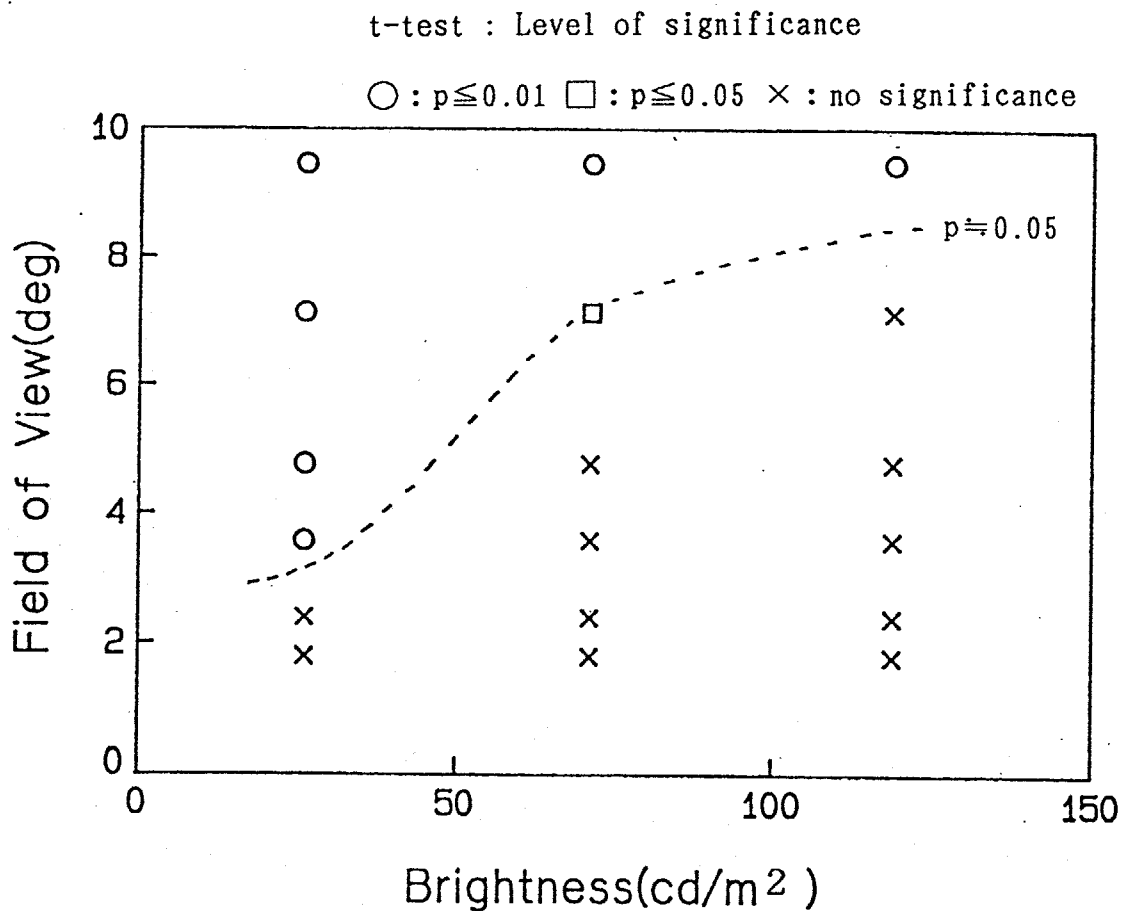


図 3 - 6 . 輝度と視野角における t 検定の結果

Fig. 3-6 Results of t-test to pupil size in several brightness and field of view.

3.3.3 注視時間との関係

前節までの実験では明、暗領域を 10 秒間の提示した結果について調べた。本節では、それぞれの領域への注視時間との関係を調べる。そこで、先に行なった実験のうち、 71 cd/m^2 の平均輝度について、注視時間を 1、2、4、6 秒と変化させて、注視時間の影響を調べた。提示パターンは明、暗領域の視野角が 30 度であるものを用い、それぞれの領域を 15 回ずつ提示した。

その結果を図 3 - 7 に示す。図中の横軸は注視時間、縦軸は、明領域と暗領域

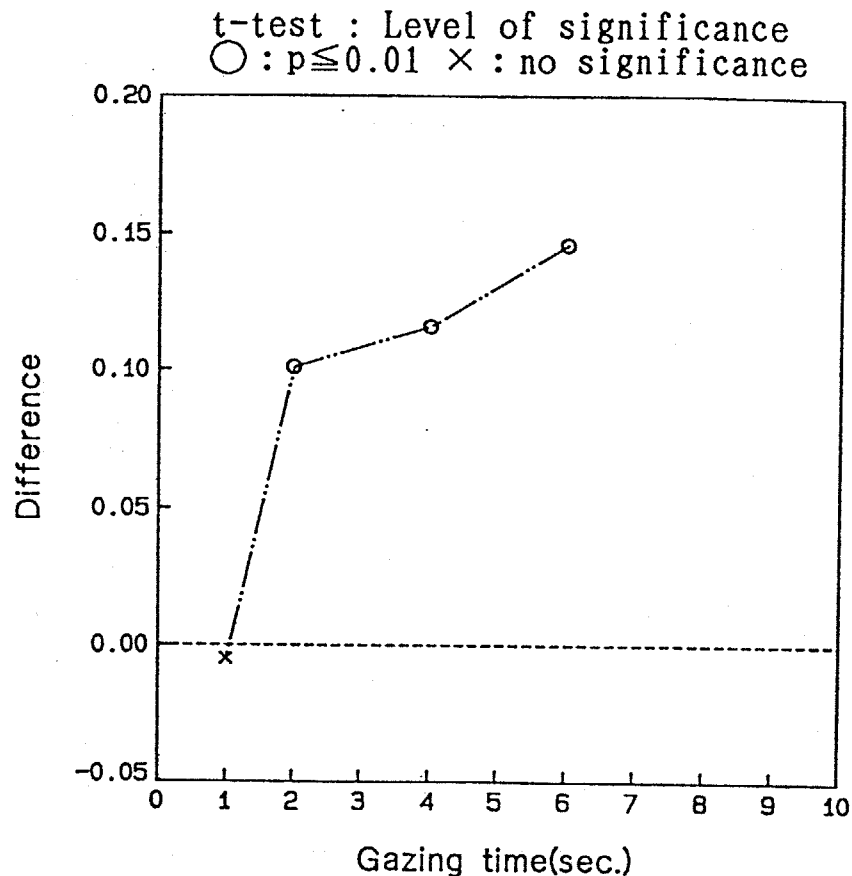


図 3 - 7 . パターンへの注視時間と明、暗領域での相対瞳孔面積差との関係

Fig. 3-7 Relations of gazing time to a pattern and pupil size
 difference between gazing point fixed to bright
 and dark area.

の相対瞳孔面積の差を示している。各注視時間でのプロットのうち、○のプロットは明、暗領域の瞳孔面積について 1 % 水準での有意な差があることを、×のプロットは有意な差がなかったことを示している。図からわかるように注視時間が短くなるに従って、明、暗領域の瞳孔面積の差はだんだん小さくなっており、注視時間が 2 秒以上ではすべて 1 % 水準で有意な差がある。注視時間 1 秒では、両者の瞳孔面積の差はなくなる。この結果から、視野角 30 度以上の領域を注視した場合でも、1 秒以下の注視時間であれば、瞳孔面積は注視領域ではなく、パターン全体の輝度で変化すると考えることができる。

3. 4 考察

前節までの結果を、実際にパターンを提示する際に適用して考察してみる。第2章で示したように、本研究における典型的な実験形態では、制作した映像パターンを37型のビデオモニタで提示している。提示映像の平均輝度が 71 cd/m^2 であるとし、その映像の任意の点を7秒ずつ注視するような見方をすれば、視野角7度の領域の輝度の影響を受けることになる。この大きさは例えば、1.5mの所からビデオモニタを見た場合、画面上で幅約18cmの領域の輝度の影響を受けることになる。

前節の注視時間を変化させた結果からもわかるように、注視する時間が1秒以下と短ければ、ビデオモニタの視野角が27度であるので、モニタ画面より大きい領域の輝度によって瞳孔面積は変化するが、その領域の輝度は画面の平均輝度によって決まると考えられる。

視点移動の研究からは、1回の注視は200～500ミリ秒であり、注視領域の大きさは視野角1～5度であるとされている。また、画像の最も暗い部分と明るい部分は必ずしも注視されない上、画像の細かい部分、すなわち、輝度の点から言えば、輝度の異なる小さい部分が集った領域もあまり注視されないことが知られている[19]。また、通常のビデオ映像における輝度の変化幅は、本実験における実験の輝度変化幅よりも小さい。

以上の結果から、提示する映像パターンの輝度の評価は画面全体の平均輝度で評価して差し支えないと考えられる。ただし、瞳孔は輝度の絶対値よりも輝度の変化の刺激を受ける[28]とされているため、これらの結果は静止画についてのみ適用できる結果であり、動画については改めて、検討を加える必要がある。

3. 5 まとめ

本実験では、輝度が異なる領域を同時に提示し、それぞれに対する瞳孔面積の変化を調べた。その結果をまとめると、以下のようになる。

- ① 明、暗領域の繰返しをサイクルとする、空間周波数が高くなると、明、暗領域に対する瞳孔面積の差は小さくなる。
- ② 注視領域のだけでなく、パターン全体の平均輝度も瞳孔面積に影響を与える。
- ③ 提示パターンの平均輝度が 26 cd/m^2 と暗い時は、視野角約 3° の領域の輝度によって瞳孔面積は変化するが、平均輝度が 119 cd/m^2 と明るくなると視野角約 9° の領域の輝度が瞳孔面積を変化させることがわかった。
- ④ 明、暗領域の視野角が 30° の提示パターンで、それぞれの領域への注視時間を変化させると、2 秒以上では瞳孔面積は変化した、注視時間が 1 秒以下になると、瞳孔面積は変化しなかった。
- ⑤ 提示する映像パターンの輝度の評価は全体の平均輝度で評価して差し支えない。

第 4 章

音声による課題を与えた時の 瞳孔面積変化

4. 1 まえがき

本章においては、学習者のアクティビティレベルが瞳孔面積で評価できるかどうかを検討した。

一般に教育の場において提示パターンは重要な役割をする。すなわち OHP や 掛け図、黒板の板書も優れた提示パターンであり、学習者はその提示パターンと音声による説明を比較しながら示された内容を理解している。したがって提示パターンについて具体的な注目点を指示した場合としない場合とでは、提示パターンに対する学習者の興味は異なると考えられる。提示時に与える指示には、指示棒によって視覚的に与える指示方法があるが、音声によってその提示パターンに対する課題や指示を与えることは通常よく行なわれ、教育的に大きな効果がある。この時の音声による課題の効果は学習者のアクティビティのレベルの変化を調べられれば測定できると考えられる。音声による課題の効果を知るためにはリアルタイムの学習者の心理的变化を知る必要がある。しかし、従来の方法では客観的な評価が行なえないことは既に第 1 章で述べた。そこで、瞳孔面積変化を測定し、検討した。特に瞳孔面積の変化が精神活動によってどのように起こるかを、基本的に調べることは興味深い問題である。そこで本実験では、第 2 章で述べた瞳孔面積測定装置によって瞳孔面積変化を測定し、学習者のアクティビティレベルとの関係を調べた。

すなわち、本章の実験では、次の点について考察することである。

- ① 学習者のアクティビティのレベルが瞳孔面積の変化によって測定できるかを検討する。
- ② パターン提示中に与える音声による課題の効果を検討する。

③精神活動を反映した瞳孔面積変化は音声刺激のみによっても反応するのかを検討する。

について考察することである。

そして、パターンを提示したときの瞳孔面積変化を調べるため、あらかじめ用意したパターンを提示して被験者の瞳孔面積を測定した。さらにこのパターン提示の途中で、音声による課題を与えた時の瞳孔面積変化を調べ、被験者のアクティビティレベルの変化との関係について考察した。また、音声による課題のみを与えた時の瞳孔面積も調べた。

4. 2 パターン提示中に課題を与えた時の瞳孔面積変化

4.2.1 実験方法

あらかじめビデオテープに連続的に収録したパターンを被験者に提示し、その途中で、そのパターンに関する問題を音声によって与えた。ここで被験者の左眼にアイマークレコーダ（ナック製：EMR-V型）を改良した瞳孔撮影用ユニットを装着しており、その映像から黒い部分の瞳孔部分の面積の時間的变化を測定し記録した。

（1） 提示パターン

被験者に提示したパターンは次に示す4種類、合計17枚のパターンである。それぞれの種類の枚数はカッコ内に示した。

- ①文字・記号パターン：地名、学科名の単語列、記号の羅列。（3枚）
- ②グラフィックスパターン：棒グラフ（2枚）
- ③数字パターン：2文字ずつ赤・緑・黄・白に着色し、羅列したもの（4枚）
- ④写真パターン：人物・風景の写真（8枚）

これらのうち①～③のパターンはビデオタイプライター（ソニー：SMC-70）を使用して青地の背景に黒のふちどりつき白文字または白線で作成した。④のパターンはビデオカメラによって撮影した。撮影時のパターン全体の輝度を色彩輝度計（東芝製：BM-2）で測定し、パターン全体の輝度が一定となるようにした。

(2) 音声による課題指示

被験者がパターンを見ている間に与えた音声課題は、いずれも答えを求める形式のものである。与えた音声による課題は次の4つのタイプに分類できる。

①指示されたものを探して数えさせる。

(7枚の内2枚には対象物が存在しない)

②棒グラフの数値を読み取らせる。(2枚)

③指示した数字を用いて加法・乗法計算をさせる。(4枚)

④提示パターンの内容について抽象的思考をさせる。(4枚)

例えば、「この絵から何を想像しますか」という課題を与える。

ここで、音声による課題に対する回答を必ずするように被験者に求めた。これは被験者が応答することによって、指示が実現されたことを確認するためである。さらにパターンの提示順は同じタイプの指示が続かないように配慮した。

(3) 提示方法

提示パターンはビデオテープに収録し、音声による課題も予め録音しておいた。次に作成したパターンをそれぞれ3回見せることにし、17枚のパターンをランダムな順で第1回目を提示した後、第2回目もランダムに17パターンを10秒ずつ見せた。その後第3回目にはパターンの提示開始5秒後に前述の音声による課題(3~5秒間)を与え、さらに10秒間提示する方法で17パターンをランダムに提示した。

なお、パターン間には前後のパターンの影響を避けるために、3秒ずつ青地のブランクパターンを挿入した。このようにして作成したビデオテープの総提示時間は約15分である。

次にパターンの提示は45インチ背面投射型ビデオプロジェクタによって行ない、これより2m離れたところに瞳孔撮影ユニットを装着した被験者を座らせてパターンを見せた。この実験の様子を図4-1に示す。ここでパターンを見ている時の被験者の瞳孔の映像を、ビデオテープに録画して後の分析に用いた。また与えた音声による課題には、その場で被験者に口頭で回答させ、その応答音声は同時に記録した。前述のように瞳孔面積の測定は、瞳孔面積測定装置によった。

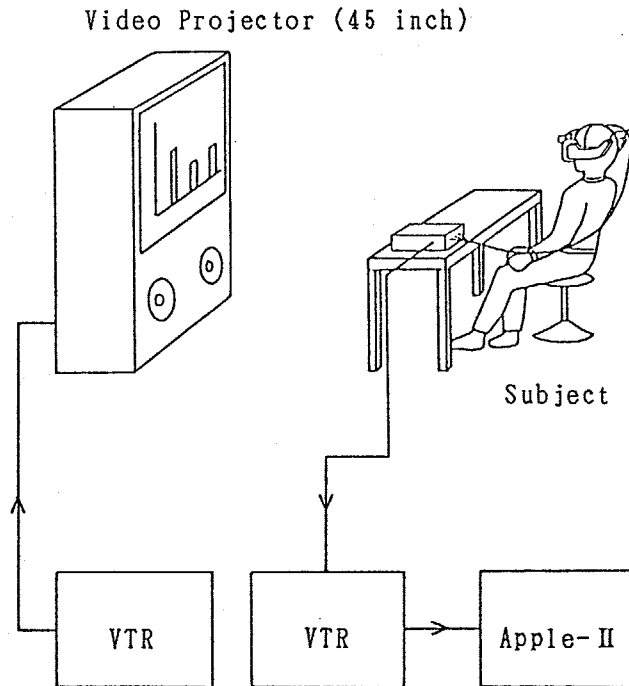


図 4 - 1 . 実験の形態

Fig. 4-1 Diagram of experimental setup.

4.2.3 実験結果

(1) 音声による課題の効果

パターン提示中に音声による課題を与えた時の瞳孔面積の時間的变化の例を図 4 - 2 に示す。この図はテレビ画面 1 フレーム (1 秒間に 30 フレーム) ごとの瞳孔面積をプロットした。図中で急激に瞳孔面積が低下している部分は瞬きによるもので、この部分は後述の処理に際しては自動的に除いた。この結果からわかるように、音声による課題を与えることにより瞳孔面積が大きくなり、回答し終えるまでの間その状態を保っているが、回答を終えると最初の状態にまで戻っている。

パターンを見ている時の瞳孔面積は 1、2 回目については提示した 10 秒間の平均値で評価した。3 回目については、提示開始から音声課題を与えるまでの 5 秒間と、音声による課題が与えられてから回答し終えるまでの間、及び回答後の

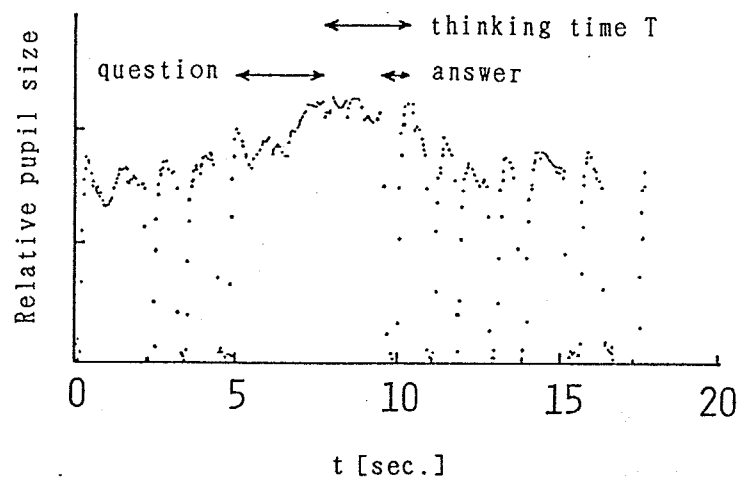
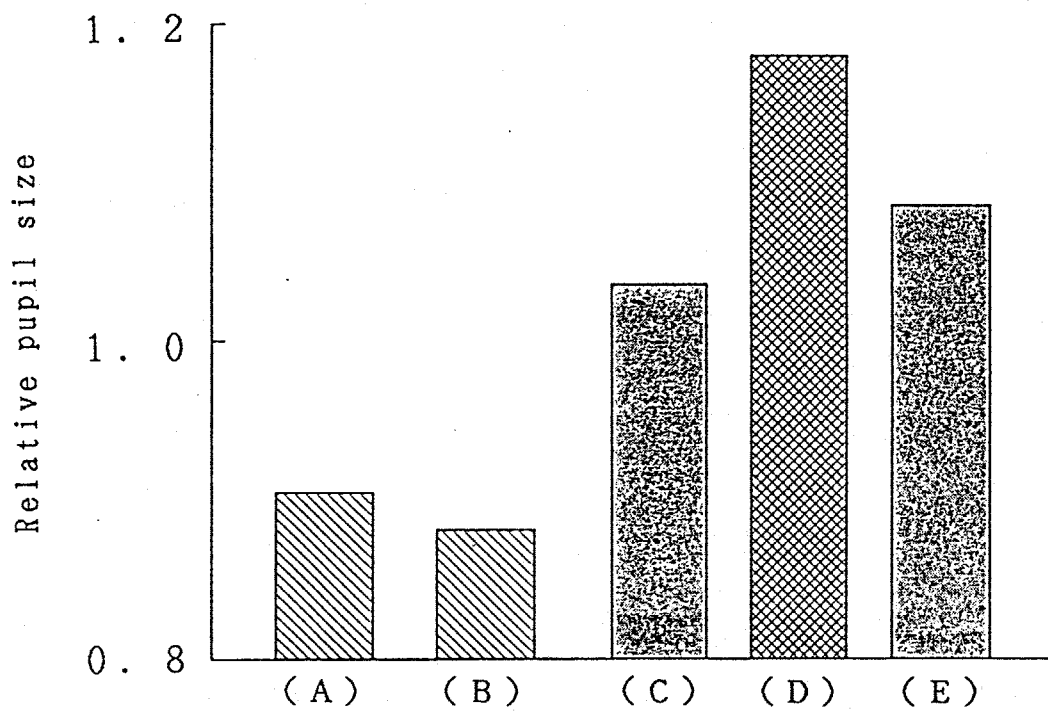


図 4 - 2 . パターン提示中の瞳孔面積変化

Fig. 4-2 Pupillary changes on giving a pattern.

平均瞳孔面積をそれぞれ測定した。ここで音声による課題が与えられてから回答し終えるまでの時間を、思考時間と呼ぶことにする。この思考時間は、簡単な課題によっては極めて短いものがあり、その場合の瞳孔面積の変化はあまり顕著ではなかった。そこでここでは瞳孔面積変化が明確である時間を考慮して、思考時間が2秒以上の結果だけを集計した。また8名の被験者について測定したが、被験者によって瞳孔の大きさは異なるので、それぞれの測定値は各被験者ごとの平均を1.0として規格化した、相対瞳孔面積値で評価した。

被験者全体をまとめた集計結果を図4-3に示す。この図からわかるように、瞳孔面積は2回目の提示で最も小さく、同じパターンを2回提示すると興味がやや低下することを意味している。3回目の提示においては、音声による課題を与えた後の思考時間中で瞳孔面積が最も大きくなっており、回答後は課題を与える前とほぼ同じ大きさにまで小さくなる。また、音声による課題を与える前の瞳孔面積も1、2回目の提示の面積より大きい。これは被験者は音声による課題を与えられる前から課題を想像し、期待しているために瞳孔面積が増大したと考えられる。さらに回答後の瞳孔面積が1、2回目の提示の際よりも大きくなっているのは、回答内容を確認したり他に回答がないかを考えているためであると考えられる。これは回答後言い直しをする被験者がいたことから推測できる。



Average of pupil size:

(A) 1st showing

(B) 2nd showing

(C) first 5 seconds after pattern shown 3rd time

(D) during thinking time

(E) following answering

図 4 - 3 . パターン提示中の相対瞳孔面積

Fig. 4-3 Relative pupil size on giving a pattern.

次に、各項目間についてt検定を行なった。その結果を表4-1に示す。この表において、 S_1 、 S_2 はそれぞれ1回目、2回目の提示における瞳孔面積を示し、 S_{3B} 、 S_{3T} 、 S_{3E} は3回目の提示中における課題を与える前、思考中、及び回答後の瞳孔面積の結果である。**印はそれぞれの項目間で、0.1%水準で有意な差があることを意味し、*印は5%水準で有意な差があることを意味する。例えば、1回目の提示(S_1)と2回目の提示(S_2)の間、及び課題を与える前(S_{3B})と回答後(S_{3E})の瞳孔面積には有意な差はないが、思考中の瞳孔面積(S_{3T})は他の全ての場合と有意な差がある。すなわち、同じパターンを2回提示すると瞳孔はわずかに小さくなるが、有意な差はない。また、パターン提示中に音声による課題を与えると、精神活動により瞳孔面積を増大させることができ、初見時の瞳孔面積よりも大きくなる。音声による課題を与える前後(S_{3B} 、 S_{3E})と1、2回目の提示(S_1 、 S_2)との間で有意な差が得られたことは、先に述べた課題に対する期待と回答内容の確認が瞳孔面積に反映されることを示している。した

表4-1. パターン提示中の瞳孔面積のt検定の結果

Table 4-2. Results of t-test for relative pupil size on giving a pattern.

		S_{3T}	S_{3E}	S_{3B}	S_1	S_2
第3回	課題の思考中(T sec.) S_{3T}		*	**	**	**
	回答後(10-T sec.) S_{3E}				**	**
	課題を与える前(5 sec.) S_{3B}				**	**
第1回 (10 sec.)	S_1					
第2回 (10 sec.)	S_2					

** : 0.1%水準で有意差あり

* : 5%水準で有意差あり

がって音声による課題を与えたり、与える予告をすることにより、アクティビティのレベルが高められることを示唆している。

(2) 各被験者の瞳孔面積変化

前節の結果は、8人の被験者全体を評価したものであるが、この節では個々の被験者の特徴を調べてみる。

まずパターン提示中の瞳孔面積変化について、被験者の中から典型的な変化をしている3人の瞳孔面積の時間的変化を図4-4、5、6に示した。これは17枚のパターンを3回にわたって提示したときの各パターンに対する瞳孔面積を、提示順に示したものである。この図において、縦軸は相対瞳孔面積で示した。第1回目および第2回目の提示における図中の●印は、各提示パターンの提示10秒間の平均値である。また第3回目の提示においては、音声による課題を与える前の5秒間の平均値●と、思考中の平均値を別々に示し、両者の変化を明確にするために●→のように矢印で結んでいる。

まず図4-4に示す被験者aの場合は、第3回目の提示における音声による課題が与えられる前後を比較するとわかるように思考中の瞳孔面積が確実に大きくなり、精神活動が瞳孔変化に忠実に現れている。これに対して被験者bの場合は、音声による課題を与えられてもその前後での変化は小さい。しかし第3回目の提示中の瞳孔面積は常に第1回目、第2回目と比較してかなり大きくなっているのは興味深い。これは第3回目の提示中においては、常に途中で音声による課題を与えたために、どのような課題を与えられるのかを考えながらパターンを真剣に見つめているためである。また被験者cの場合は提示が第1回目、第2回目、第3回目と続くにつれて瞳孔面積が小さくなっており、パターン及び実験に興味がなく、しだいに飽きて来た結果である。したがって、この被験者cは第3回目の提示時に音声によって課題を与えても、第1回目の提示時よりも瞳孔面積は小さい。この被験者はたまたま実験前に長時間、やや過激な運動をしており、疲労のために与えられた課題を忠実に実行できなかった結果である。そこでこの被験者cは特例と考えられるので、前節に示した全体の評価から除いた。

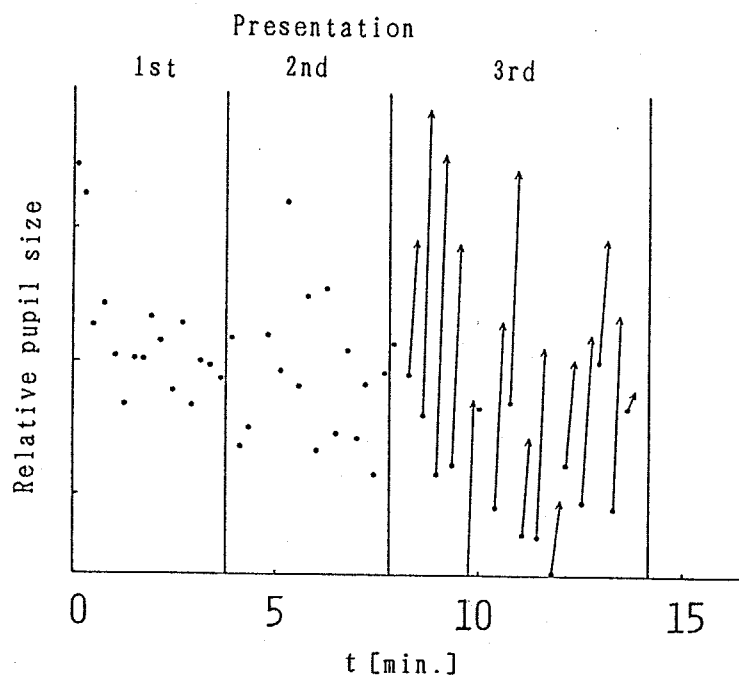


図 4 - 4 . 瞳孔面積の時間的変化 (被験者 a)

Fig. 4-4 Pupillary changes for each pattern by Subject a.

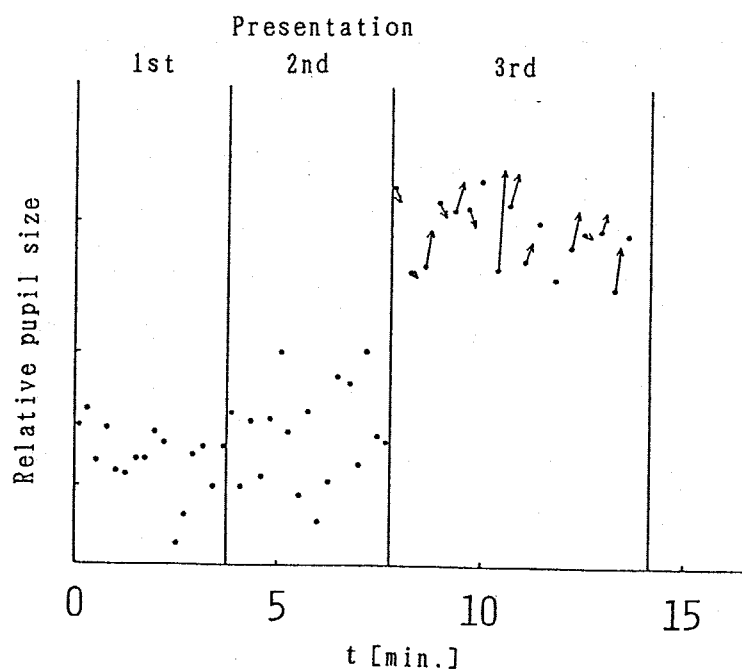


図 4 - 5 . 瞳孔面積の時間的変化 (被験者 b)

Fig. 4-5 Pupillary changes for each pattern by Subject b.

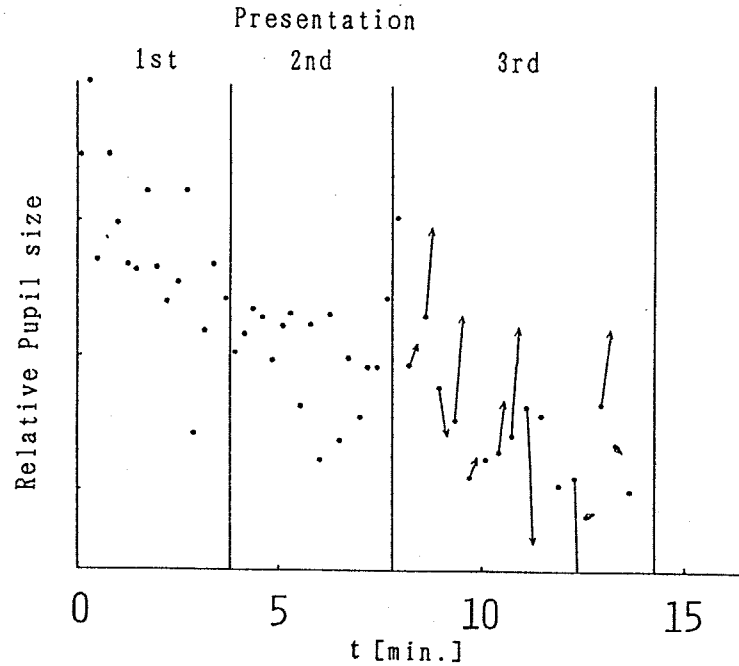


図 4 - 6 . 瞳孔面積の時間的变化 (被験者 c)

Fig. 4-6 Pupillary changes for each pattern by Subject c.

次に上記 3 人の被験者に対する瞳孔面積の時間的变化を図 4 - 7、8、9 に示す。これらの図では、同一のパターンを提示した時の 1 回目の瞳孔面積変化 (点線) と 3 回目の瞳孔面積変化 (実線) を重ねて示している。被験者 a (図 4 - 7) は、音声による課題を与えるまでは、瞳孔面積が 1、3 回目とも同じであるが、音声による課題を与えると、瞳孔面積が大きくなる。被験者 b (図 4 - 8) は、第 3 回目の提示では音声による課題を与える前から 1 回目比べて瞳孔面積は大きく、課題を与えた前後の変化は小さい。ところが、被験者 c (図 4 - 9) は、3 回目の瞳孔面積は 1 回目より小さい。その他に、被験者 a と b との中間的な特性 (ab タイプ) を示す被験者もいた。それぞれの瞳孔面積の変化のパターンをタイプ a, b, ab, c と呼ぶことにする。

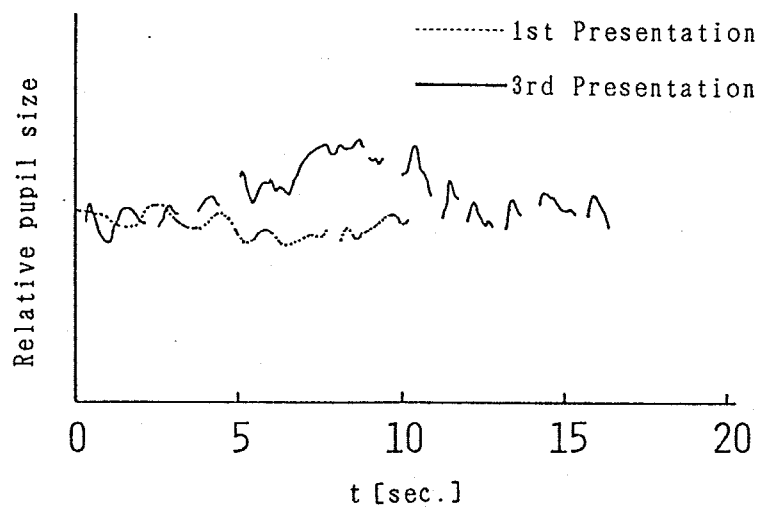


図 4 - 7 . 第 1 回目、第 3 回目のパターン提示中の瞳孔面積変化 (被験者 a)
 Fig. 4-7 Pupillary changes on giving a pattern at the first and third presentation (Subject a).

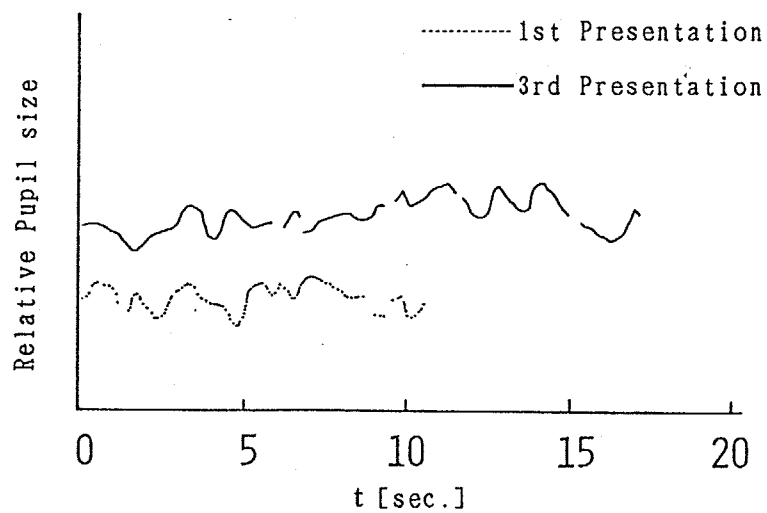


図 4 - 8 . 第 1 回目、第 3 回目のパターン提示中の瞳孔面積変化 (被験者 b)
 Fig. 4-8 Pupillary changes on giving a pattern at the first and third presentation (Subject b).

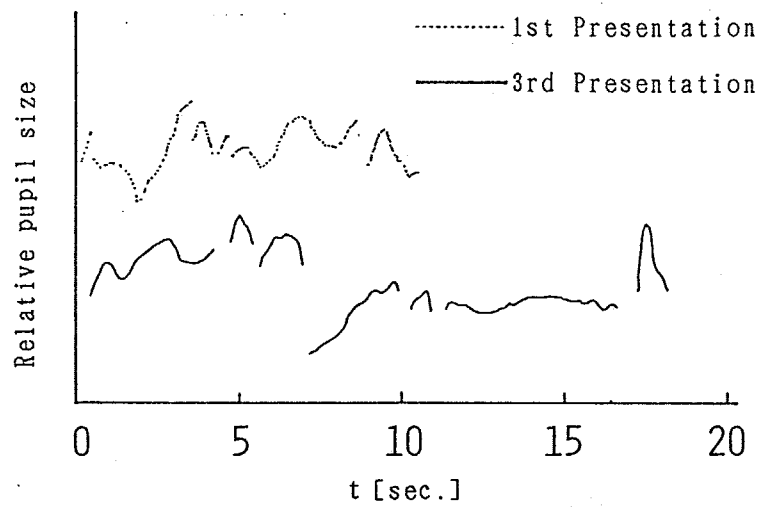


図 4 - 9 . 第 1 回目、第 3 回目のパターン提示中の瞳孔面積変化 (被験者 c)

Fig. 4-9 Pupillary changes on giving a pattern at the first and third presentation (Subject c).

ここでこれら 4 つのタイプのちがいをより明確に示すために、次式で定義した X、Y を横軸縦軸として、代表的な被験者の特性を図 4 - 1 0 のように表してみた。

$$X = \frac{S_{3T} - S_{3B}}{S_{3B}} \quad (\%)$$

$$Y = \frac{S_{3B} - S_1}{S_1} \quad (\%)$$

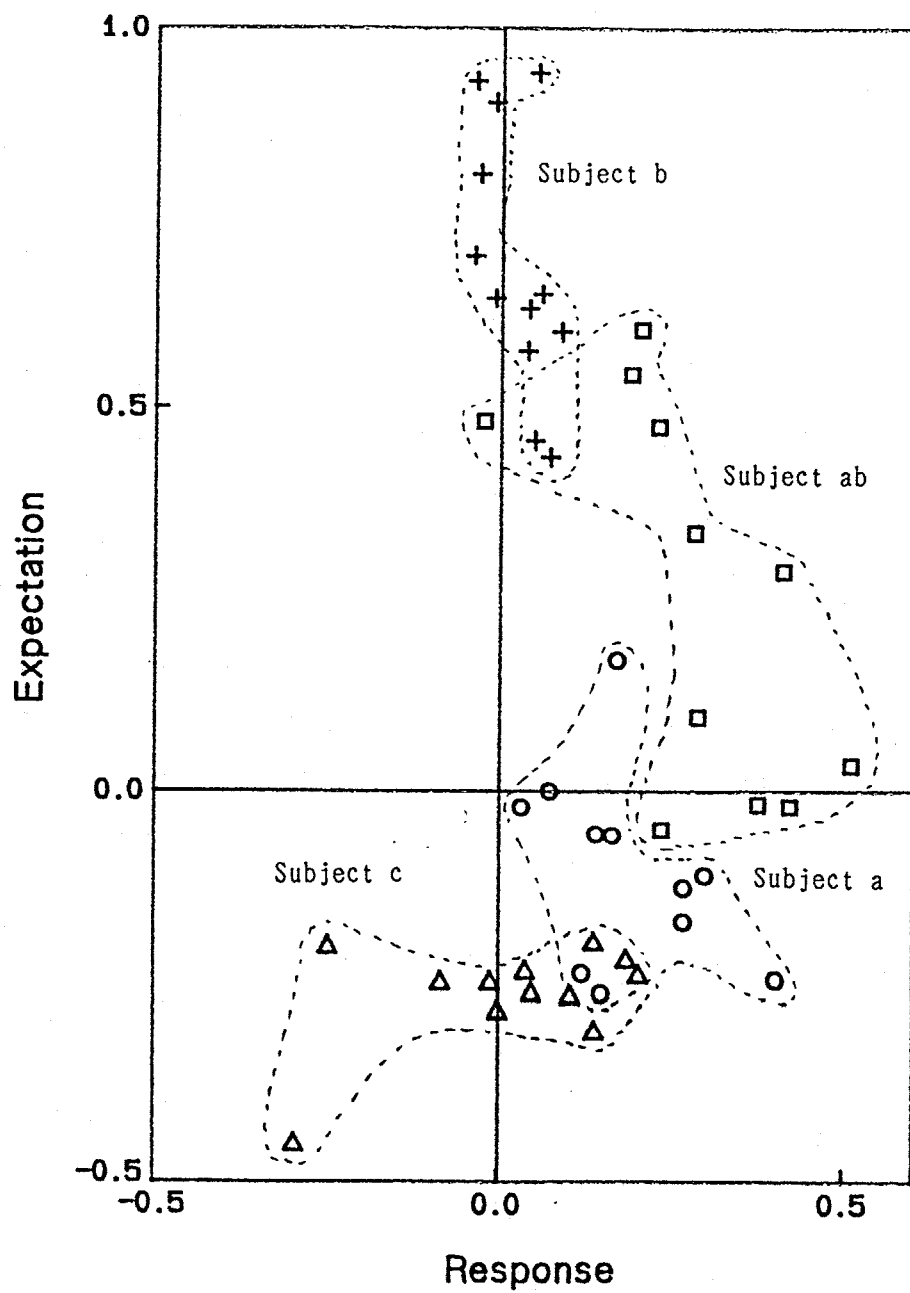


図 4 - 1 0 . 課題に対する変化から分類した代表的な被験者のタイプ
 Fig. 4-10 Typical subject types analyzed by response and expectation
 for questions.

ただし、式中の S_1 は第 1 回目の平均瞳孔面積であり、 S_{3s} は第 3 回目の課題を与える前の平均瞳孔面積、 S_{3r} は第 3 回目の課題の思考中の平均瞳孔面積である。すなわち、横軸は、音声による課題を与えた前後に対する変化の度合い（反応度）であり、縦軸は、1 回目と 3 回目の課題提示前の瞳孔面積変化を表し、課題をどの程度期待しているかを示す度合い（期待度）である。図 4-10 では各提示パターンごとにプロットしている。この図からわかるように 4 つのタイプは大きく分れている。

そこで、これらを全被験者について平均と標準偏差を求めてプロットしたのが図 4-11 である。各被験者の平均値について原点からの位置ベクトルを定義し、その大きさ及び角度を求めた。その結果を表 4-2 に示す。図 4-11 と表 4-2 より、被験者 a のような反応度が高い被験者や被験者 b のような期待度が高い被験者の存在が確かめられる。

位置ベクトルの角度 θ の絶対値が小さい（正の X 軸に近い）被験者ほど、前述の被験者 a のように反応度が高いことを示し、 θ が 90° に近い（正の Y 軸に近い）被験者は期待度が高いことになる。このように本実験における瞳孔反応は被験者によって異なるため、被験者のタイプを分類することも可能であると思われるが、これは今後の課題である。

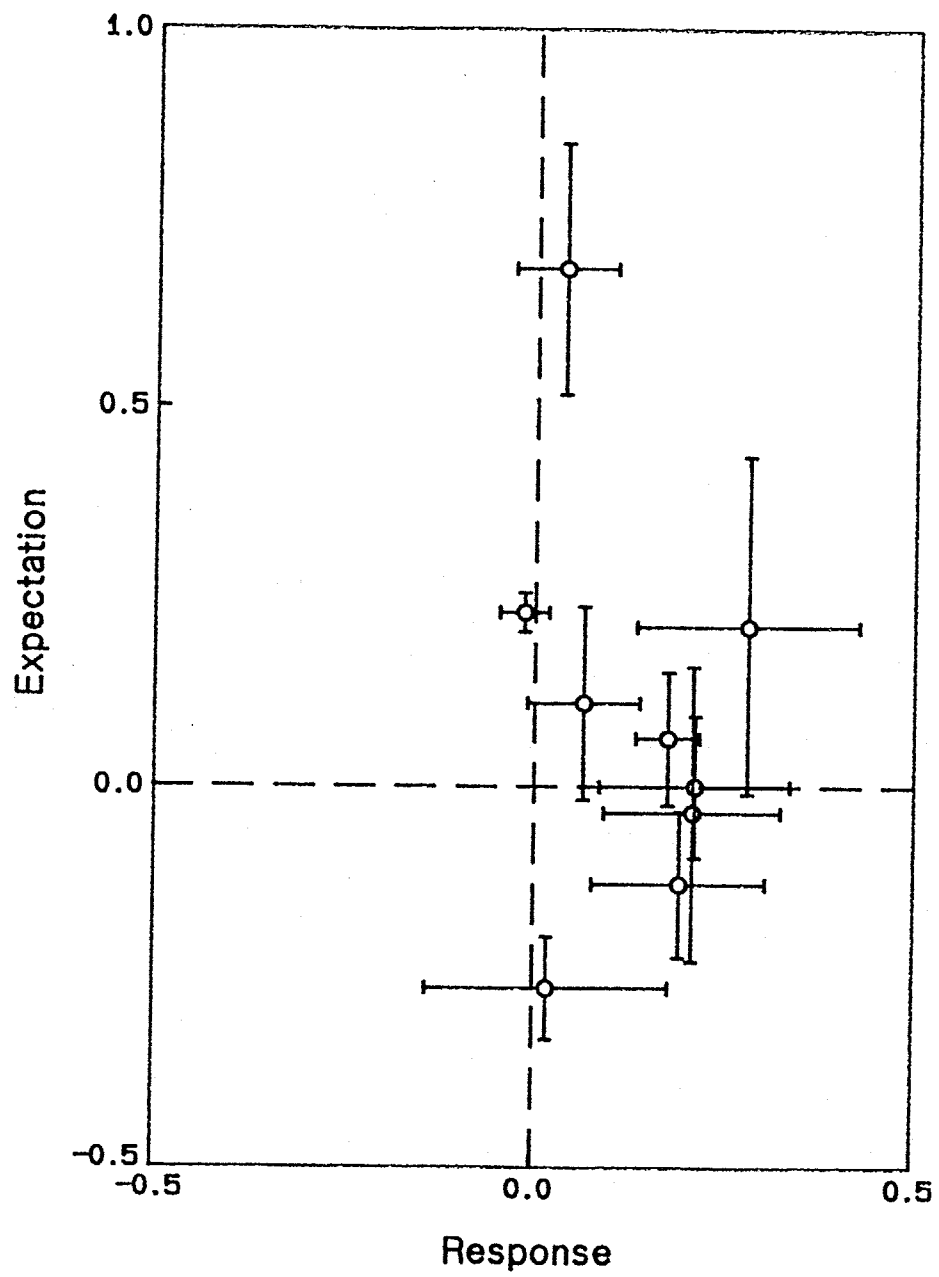


図 4 - 1 1 . 全被験者の瞳孔面積による反応度と期待度

Fig. 4-11 Relations of response and expectation for questions.

表 4 - 2 . 各被験者の平均値の位置ベクトル

Table 4-2. Postion vector of each subject from response and expectation.

被験者	θ (deg.)	ベクトル の大きさ
1	93.5	23.2
1	86.8	68.4
3	59.7	12.9
4	37.2	35.3
5	20.0	18.7
6	0.0	21.2
7	- 9.5	21.2
8	-33.9	23.1
9	-85.9	26.6

4. 3 音声課題のみによる瞳孔面積変化

前述のように、パターン提示中に音声による課題を与えると、瞳孔面積が増加することがわかった。このような変化が、意味のあるパターンを視覚的に提示せずに、音声による課題のみを与えた場合にも誘発されるのかを調べることは興味深い。そこでここでは、画面中央に+印のみがあるパターンを提示している時に、音声による課題を与えて、その時の瞳孔面積変化を調べた。

4.3.1 実験方法

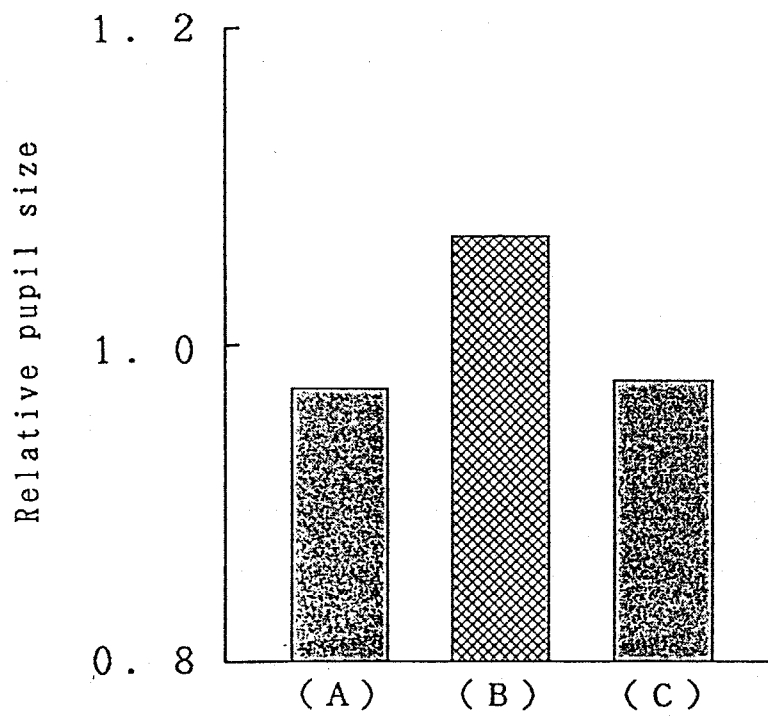
まず、被験者に何も提示しない状態で瞳孔面積を測定したところ、被験者の眼球は激しく動き、瞳孔面積を正確に測定できなかった。そこで、被験者の眼球を制止させるために、提示画面中央に小さな+印のみがある提示パターンを用意した。被験者がこの意味を持たない+印を静視している状態で、被験者に音声による課題を与え、その時の瞳孔面積の変化を調べた。

音声による課題は、簡単な乗法・加法計算を行なわせるもので、各2題ずつ合計4題を与えた。この課題提示の音声は30秒ごとに与え、あらかじめビデオテープに録音した。この総提示時間は約3分である。

また計算結果は口頭で回答させ、そのときの瞳孔面積変化と、回答をビデオテープに記録して分析した。

4.3.2 実験結果

実験は被験者8人に対して行い、その結果を図4-12に示す。ここで、音声による課題の効果を調べるために、課題を与える前10秒間、思考中、回答後10秒間の3つの場合について平均瞳孔面積を求めた。測定値は各被験者ごとに規格化して、相対瞳孔面積で評価した。この図からわかるように瞳孔面積は課題の思考中が最も大きくなっており、課題を与える前と後の相対瞳孔面積はほぼ同じ大きさである。



Average of pupil size:

(A) 10 seconds before an instruction

(B) during thinking time

(C) 10 seconds after answering.

図 4 - 1 2 . 音声による課題のみを与えた時の相対瞳孔面積

Fig. 4-12 Relative pupil size on giving meaningless pattern.

次に、各場合について t 検定を行なった結果を表 4 - 3 に示す。ここでも同様に課題を与える前 10 秒間 (S_B)、思考中 (S_T)、回答後 10 秒間 (S_E) としている。* 印はその項目間で 0.1% 水準で有意な差があることを意味する。すなわち、思考中 (S_T) と課題を与える前、回答後 (S_B 、 S_E) との間で 0.1% 水準で有意な差が得られ、課題を与える前と回答後では有意な差はない。したがって、音声による課題のみによっても瞳孔面積が増加することがわかる。すなわち、視覚刺激に関係なく、与えられた課題について思考する精神活動そのものが瞳孔面積に反映されていると考えることができる。またこの傾向は各被験者についても同様に言えることである。

表 4 - 3 . 音声のみによる課題のみを与えた時の瞳孔面積の t 検定の結果
Table 4-3. Results of t-test for relative pupil size on meaningless pattern.

		S_T	S_E	S_B
課題の思考中	S_T		**	**
回答後 (10s)	S_E			
課題を与える前 (10s)	S_B			

** : 0.1% 水準で有意差あり

4. 4 まとめ

以上本実験では、音声による課題を与えた場合の瞳孔面積変化を調べたが、その結果をまとめると次のようになる。

①パターン提示中に、そのパターンに関する音声による課題を与えたり、その予告を与えると、瞳孔面積が増加することがわかった。これは課題によってアクティビティのレベルが高められた結果と考えられる。

②瞳孔面積の変化を分析した結果、以下の4つに被験者を分類した。

(1) 音声による課題に対して忠実に瞳孔が反応する a タイプ、

(2) 与えられる課題を予め期待し、課題が与えられる前から瞳孔が大きくなっており、課題に対する変化は小さい b タイプ、

(3) 課題を予め期待し、しかも与えられた課題に対しても反応する a b タイプ (a タイプと b タイプの間)、

(4) 課題が与えられても興味が低く、反応も小さい特例的な c タイプ

③意味のない+印のパターンを提示中に、音声による課題を与えることによって瞳孔面積が増加することを示した。この結果から、瞳孔面積変化は提示されたパターンについて思考した時に起きるのではなく、精神活動そのものが瞳孔を変化させていると考えられる。

以上の結果のように、教育の場で音声による問題や課題を与えることは効果的であり、学習者のアクティビティのレベルを高めることができる。また、本章の実験の手法を用いてより有効な提示パターンの開発研究や、学習時における学習者のタイプと学習意欲等を調べる事が可能となると考えられる。

第 5 章

瞳孔面積変化からの輝度の影響の分離

5. 1 まえがき

前章では、音声によって課題を与えることによって学習者のアクティビティのレベルが上昇し、それが瞳孔面積に反映され、瞳孔面積によって客観的に学習者のアクティビティのレベルが測定できることを示した。

一方、テレビ番組などの映像の評価はイメージテストなどの主観的評価によっていた。このような方法では番組全体に対する漠然とした評価した行なえなかった。テレビ番組などは内容が時々刻々と変化しているので、リアルタイムで、しかも客観的な評価が得られることが必要である。すでに番組評価の客観的指標として、G S R (Galvanic Skin Reflex) を用いた方法がある[6]。

瞳孔面積は、前述のように精神活動によって変化し、レスポンスが極めて良い生体情報であるので、番組評価の有効な客観的指標になり得ると思われる。しかし、テレビ番組は時々刻々と画面の明るさが変化するので、第1章で述べたような対光反射による瞳孔変化と精神活動による瞳孔変化が重なり合うため、これらを分離しないと評価を行なえない。輝度の影響について、Hessら[29]は種々のスライドを被験者に見せる時にスクリーン上に輝度の異なる部分を提示する実験を行なった。その結果、スライドが投影されたスクリーンの明るさの違いは瞳孔面積の変化に対して大きな影響を与えないと結論づけている。しかし、Hessらの結果でも、部分的には明るさの影響が多少あることが示されている。以上のことから明るさと精神活動による瞳孔面積変化を分離することが必要であるが、この点に関してはほとんど明らかにされていない。特に、瞳孔と明るさとの関係は影響する因子が多いため、その決定は困難であるとされているものの、ある程度の明るさまでは一定の割合で変化し、それ以上では明るさにかかわらず一定となるとされている[28]。

そこで本章の実験では、提示パターンの輝度と精神活動による瞳孔面積変化を調べ、輝度変化だけでの瞳孔面積変化の結果から輝度の影響を取り除く方法を検討し、分散分析の手法によって評価した。さらにこの方法を用いて、提示パターンに対する興味の評価を試みた。すなわち、以下のことを目的とした。

- ①瞳孔面積変化における提示画面の輝度と精神活動の2つの要因がどのように関係しているかを調べる。
- ②瞳孔面積が輝度変化によってどのように変化するかを調べ、瞳孔面積と輝度との関係式を導き、輝度による変化を取り除いて、心理的变化を抽出する方法を検討する。
- ③輝度を変化させたパターンを提示した時の瞳孔面積から興味による変化量のみを抽出し、検討する。

そのため、瞳孔面積測定装置を装着した被験者に、輝度の異なるパターンを多く提示し、その時の瞳孔面積を測定し、分析した。

5. 2 提示画面の輝度による瞳孔面積変化

提示パターンの平均輝度が異なるパターンを提示し、輝度による瞳孔面積変化を調べた。さらに精神活動による瞳孔面積変化との関係も調べるために、音声によって提示パターンに関する課題を被験者に与えた。

5.2.1 提示パターンの作成方法

提示パターンはカラー写真をビデオカメラで撮影し、ビデオテープに収録して連続的に提示できるように編集した。実験ではパターン全体の輝度による瞳孔面積変化を調べるので、次の方法でパターン全体の輝度を調節した。すなわち、ビデオカメラで撮影した提示パターンを9型のビデオモニタに提示し、色彩輝度計で画面全体の輝度を測定して、これを提示パターン全体の平均輝度とした。撮影の際、提示されるパターン全体の平均輝度を一定にするため、ビデオカメラのアイリスを変化させてモニタの平均輝度が一定になるように撮影した。これは照明による明るさを変化させると、被写体の色温度が変化するためである。パターン

作成の方法を図 5 - 1 に示す。

この方法で 2 段階の輝度のパターン群を作成し、高輝度画面用としてパターン 30 枚、低輝度画面用としてパターン 30 枚の計 60 枚を撮影した。

さらにパターン提示時の精神活動を調べるため、高輝度画面用パターン 14 枚と低輝度画面用パターン 14 枚の計 28 パターンにはあらかじめ音声による課題をビデオテープに映像と共に録音した。課題は、提示パターンの中にいる人数や、咲いている花の名前などのようにパターンの内容に関する質問を音声によって被験者に与えるものである。

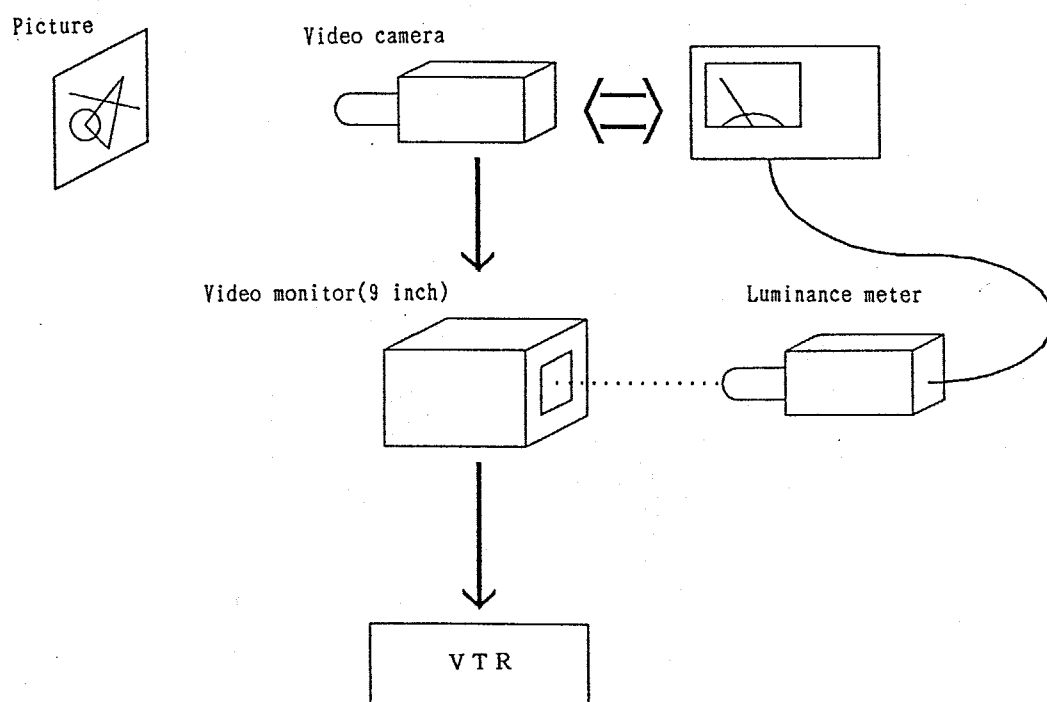


図 5 - 1 . パターンの作成方法

Fig. 5-1 A procedure of controlling patterns brightness.

5.2.2 実験方法

実験の形態を図5-2に示す。前節の方法で作成した提示パターンを37型ビデオモニタに提示し、ビデオモニタから1.5m離れたところに瞳孔面積測定装置を着けた被験者をおき、パターン提示中の被験者の瞳孔の映像と視点移動の映像を同期させた2台のVTRで収録した。

課題に対しては実験前に、被験者に口頭で必ず回答するように指示を与えておき、その音声は記録用のVTRで記録した。

1パターンの提示時間は課題を与えないパターンでは、10秒間提示した。課題を与えるパターンでは15秒間提示し、パターン提示後5秒後に課題を与えた。いずれの場合もパターン相互の影響をなくすために、パターン間には3秒間の青地のブランクパターンを提示した。

瞳孔面積は課題を与えない場合はパターンを提示した10秒間の平均で、課題を与えた場合は課題を与え始めてからの10秒間の平均で評価した。

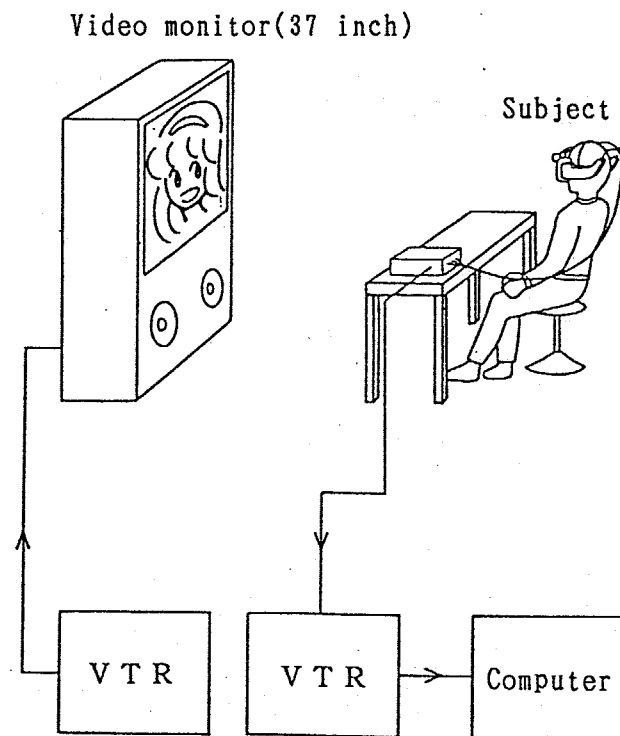


図5-2. 写真パターンの提示実験の形態

Fig. 5-2 Diagram of experimental setup for presented picture pattern.

パターン提示の際にはビデオモニタ画面の明るさも2段階に変化させて同一の60枚のパターンを同じ被験者に2回提示した。すなわち、パターンは高輝度と低輝度の2種類あるので、合計で4段階の輝度に対して実験したことになる。この時のビデオモニタの画面の平均輝度は 12.1cd/m^2 、 37.6cd/m^2 、 71.9cd/m^2 、 107.5cd/m^2 であった。さらに、2段階での青地のブランクパターンの平均輝度はそれぞれ 20.9cd/m^2 、 42.6cd/m^2 であった。この実験を6人の被験者に対して行った。

5.2.3 実験結果

(1) 瞳孔面積と輝度との関係

画面の平均輝度と相対瞳孔面積の関係を、課題を与えた場合と与えなかった場合について図5-3に示した。瞳孔は各被験者によって大きさが異なるため、各被験者ごとに規格化する必要がある。そこで、各被験者ごとに全条件で測定した

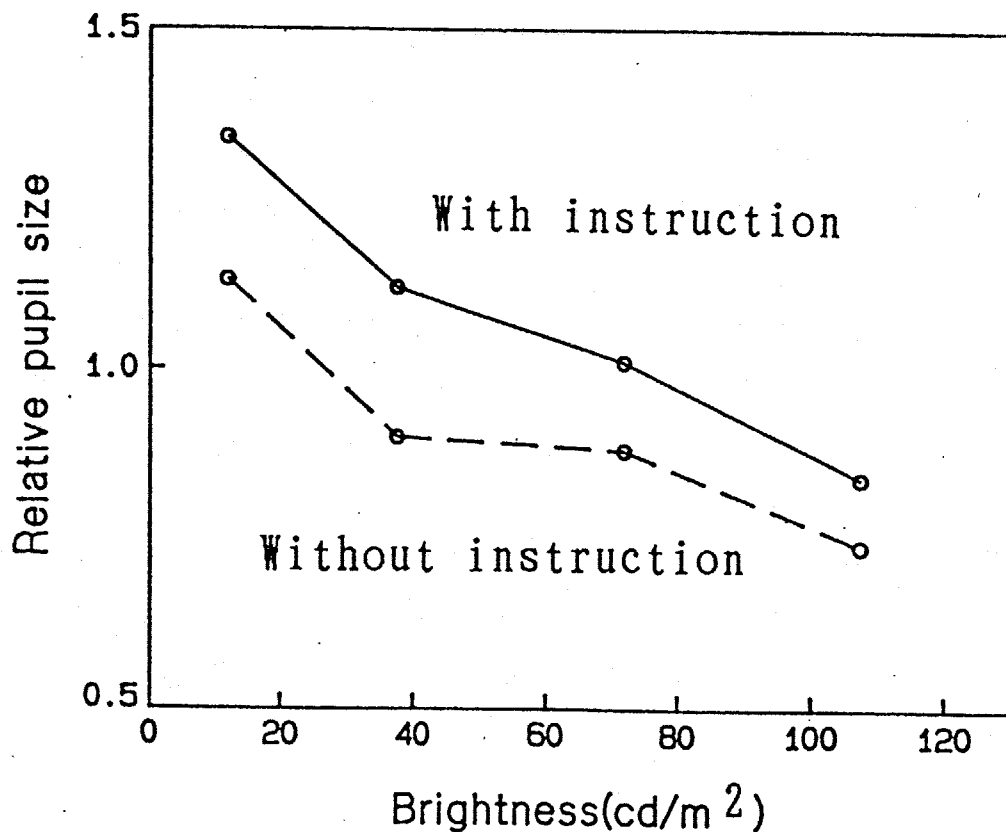


図5-3. 画面の輝度を変化させた時の輝度と相対瞳孔面積の関係

Fig. 5-3 Relations of pattern brightness and relative pupil size.

瞳孔面積の平均値を1.0として規格化し、これを相対瞳孔面積と定義した。図中の実線は課題を与えた時、鎖線は課題を与えなかった時の相対瞳孔面積である。

相対瞳孔面積と輝度との関係を見ると、輝度が高くなるにしたがって相対瞳孔面積は小さくなっており、提示パターンの輝度が明るくなると瞳孔面積は小さくなっている。次に、課題を与えた時の相対瞳孔面積を見ると、課題を与えなかった時と同様に輝度が明るくなるにしたがって、面積は小さくなっているが、課題を与えることによって面積は増大している。課題による相対瞳孔面積の増加率は精神活動による面積の変化率を意味しており、課題による瞳孔面積の増加率はほぼ一定であることが図からわかる。t検定の結果、いずれの輝度の条件でも、課題を与えた場合と与えない場合の瞳孔面積の間には1%水準で有意な差があり、精神活動によって瞳孔面積が増大することが確認できた。

(2) 分散分析の結果

瞳孔面積変化における精神活動と輝度の2つの要因がどのように関係するのかを分散分析によって調べた。

瞳孔面積変化の要因が精神活動と輝度であるとした分散分析の結果を表5-1に示す。ここで精神活動については、課題を与えた場合と与えなかった場合の2値として、輝度についてはパターンの平均輝度を用いて分析した。その結果、課題による精神活動と輝度の要因は、それぞれF検定の結果1%水準で有意であり、課題と輝度はそれぞれ瞳孔面積の変化の要因であることが認められる。さらに、精神活動と輝度の間の交互作用については、F検定の結果、F値が0.3となり、有意ではないことがわかった。すなわち、両者の交互作用は瞳孔面積変化について、有意な要因であるとは認められない。このことから精神活動と輝度の要因は独立に瞳孔面積変化に作用していると結論される。従って、提示したパターンの輝度による瞳孔面積の変化量を知ることができれば、瞳孔面積測定値からその変化量を取り除き、精神活動のみによる瞳孔面積の変化を測定することができる。

表 5 - 1 . 分散分析の結果

Table 5-1. Results of two-way ANOVA : Repeated measure by subject.

要 因	自由度	変動	分散	F
精神活動	1	0.30	0.30	10.5**
輝度の影響	3	1.24	0.41	14.3**
交互作用	3	0.03	0.01	0.3
e	40	1.15	0.03	
	47	2.72	0.06	

** : F - 検定で 1 % 水準で有意

5. 3 輝度変化のみによる瞳孔面積変化

前節において瞳孔面積は精神活動と輝度によって独立に変化することが明らかになった。そこで、本節では輝度変化のみによる瞳孔面積の変化を調べた。

5.3.1 実験方法

実験は明るさの対比実験[20]に準じた方法で行なった。すなわち、まわりの明るさの影響を避けるために、開放された背後の位置に黒ビロードの暗幕によって暗黒の背景をつくり、その50 cm前に黒紙を貼って暗黒としたパターン提示版を置き、その提示版上で37型テレビモニタの画面と同形で意味を持たない黒、灰、白の単色の3枚の紙パターンを順番に提示した。この実験の形態を図5-4に示す。

提示パターンにハロゲン系のランプ2灯で照明し、スライダックで電圧を変化させてパターンの輝度を変化させた。この場合は提示パターンが白、灰、黒であることからパターンの明度のみが変化し、彩度、色相は変化しないので輝度による瞳孔面積変化を調べることができる。パターンの輝度は、テレビ画面の輝度範囲内(10~200cd/m²)となるように照明した。パターンは各輝度ごとに30秒ずつ提示し、このうち最初と最後の10秒を除いた10秒間で瞳孔面積を評価した。この実験を7人の被験者について行なった。

5.3.2 実験結果

輝度変化と相対瞳孔面積の関係を図5-5に示す。図中の○のプロットが実験結果である。前節での実験結果と同様に、輝度が高くなるにつれて瞳孔面積が規則正しく小さくなっていることがわかる。ここで、輝度が独立変数で相対瞳孔面積が従属変数となる関数を仮定すれば、任意の輝度の提示パターンに対する、相対瞳孔面積が決まることになる。そこで、この結果から、輝度を独立変数とする相対瞳孔面積の関数を導出することにした。図5-5のような単調減少をする関数として、4つの関数を仮定し、それぞれの関数について実験値をあてはめ、実験値と推定した関数値との差(δ)の二乗和($\sum \delta^2$)が最小となるように、最小二乗法によって関係式を決定し、その最小二乗和が最も小さくなる関数を、こ

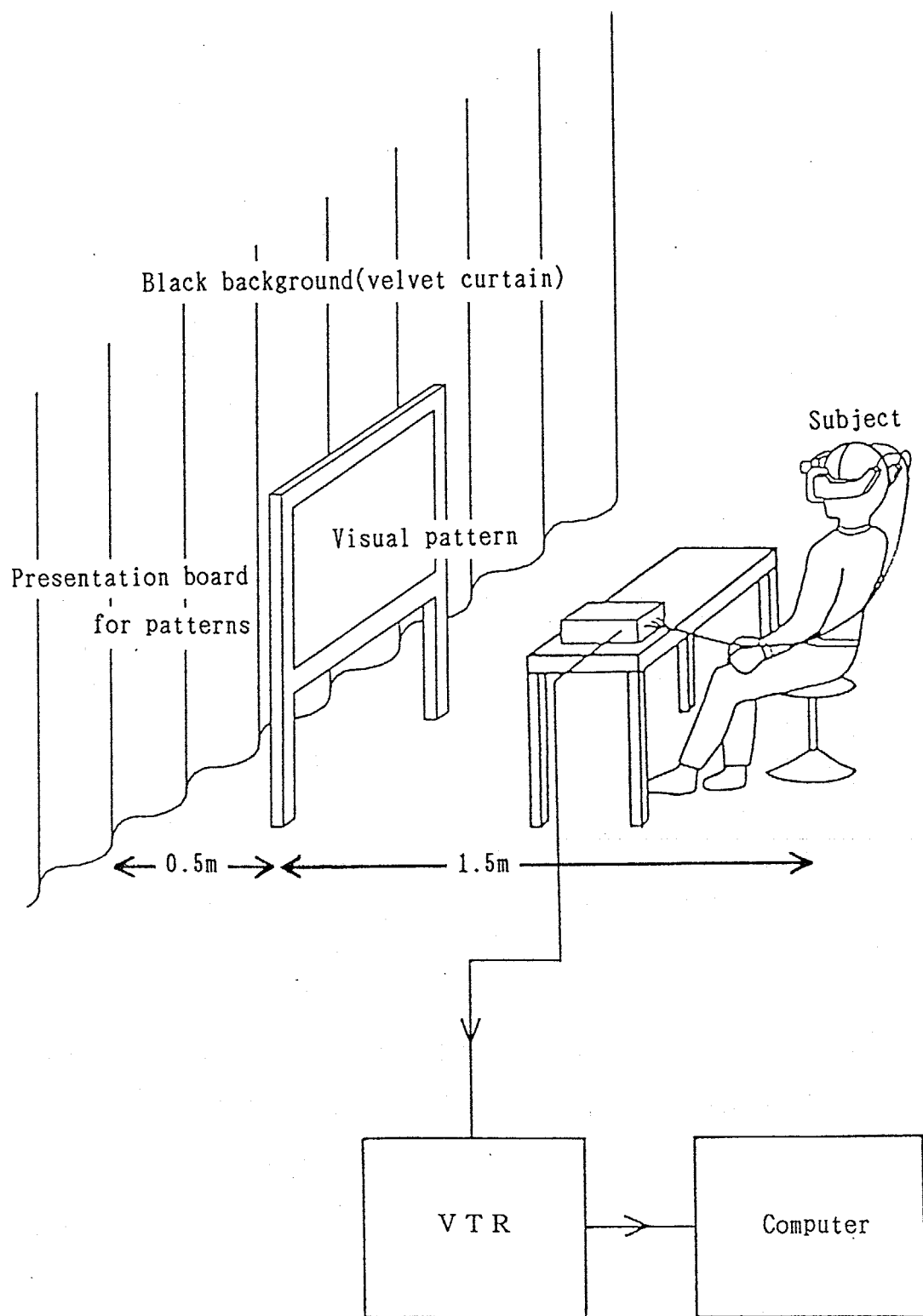


図5-4. 単色のパターン提示実験の形態

Fig. 5-4 Diagram of experiment for presented mono-color pattern.

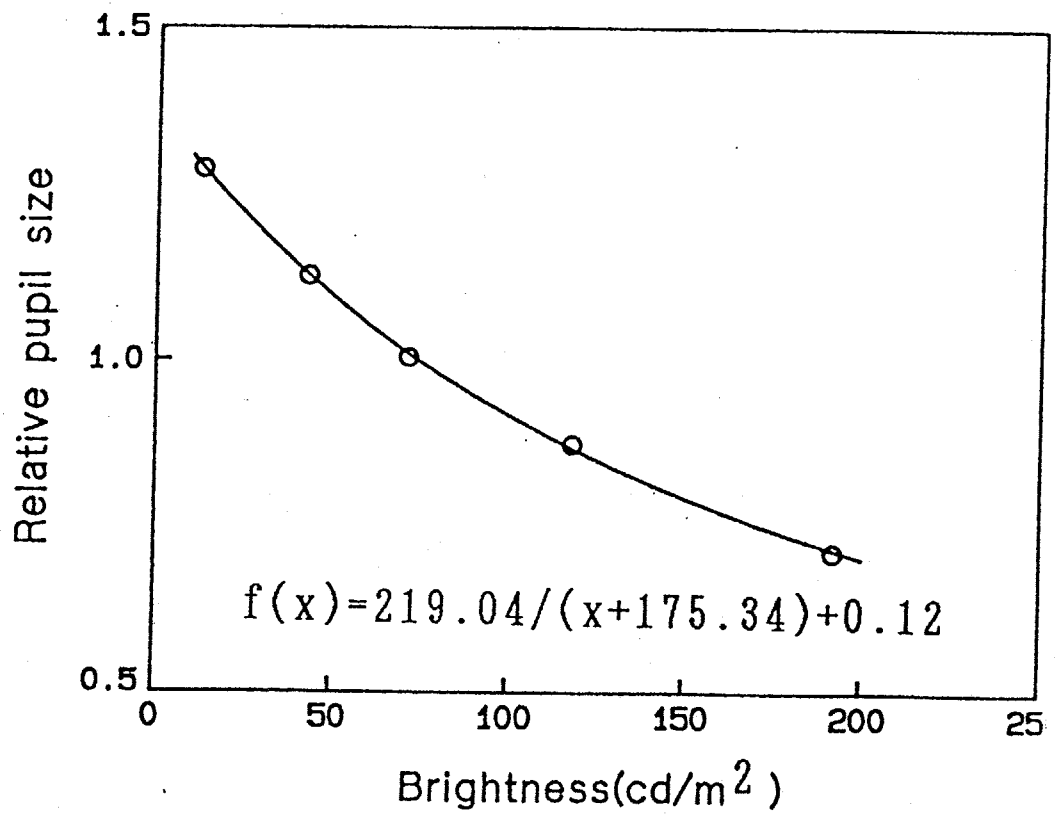


図 5 - 5 . 単色パターンの各輝度における相対瞳孔面積とその関係式
 Fig. 5-5 Experimental function of brightness in mono-color pattern
 and relative pupil size.

の相対瞳孔面積の関数とすることにした。仮定した関数は以下の4つである。

$$\textcircled{1} f(x) = \frac{a}{(x+b)} + c$$

$$\textcircled{2} f(x) = ax^2 + bx + c$$

$$\textcircled{3} f(x) = \exp(bx)^a + c$$

$$\textcircled{4} f(x) = -\sqrt{ax+b} + c$$

実験値との差の最小二乗和を求めた結果を表5-2に示す。表に示すように、
 $\textcircled{1}$ の場合は最小二乗和は0.000069となり、最も小さくなった。 $\textcircled{1}$ と仮定して、導
 出された関係式を以下に示す。

$$f(x) = \frac{219.04}{(x+175.34)} + 0.12$$

これは瞳孔の直径が光の強さの平方根に逆比例する[28]、すなわち網膜上に到
 達する光の量が常に一定であるとされていることとも一致する。

この関係式を実験結果に書き加えると図5-5のようになる。図からわかるよ
 うに、実験値とよく一致している。この関数で求められる瞳孔面積をここでは瞳
 孔面積標準値と呼ぶことにする。

表 5 - 2 . 仮定した関数とその最小二乗和

Table 5-2. Functions and value of least square.

仮定した関数	最小二乗和 ($\Sigma \delta^2$)
$f(x) = \frac{219.04}{(x+175.34)} + 0.12$	0. 0 0 0 0 6 9
$f(x) = 0.11E-4x^2 + 0.54E-2x + 1.09$	0. 0 0 0 4 2
$f(x) = \exp(1239.92x)^{0.75} + 0.75$	0. 4 4
$f(x) = -\sqrt{(0.0031x+0.29E-9)} + 1.23$	0. 0 0 0 1 3

x:Luminace(cd/m²)

5.3.3 瞳孔面積の補正

本節で得られた関係式を前節の実験結果に適用して、パターンの輝度による変化量を取り除く方法を考察する。

前節では4つの平均輝度に対する相対瞳孔面積が得られており、本節ではその輝度に対する瞳孔面積標準値が得られることがわかった。輝度の影響を除去する方法は種々考えられるが、ここでは瞳孔面積標準値に対する相対瞳孔面積の比を補正後の相対瞳孔面積とすることにした。また、適用する輝度範囲によって瞳孔面積標準値の平均が変化するので、そのまま用いると補正後の相対瞳孔面積の平均値も変化する。そこで、適用する範囲内で得られた瞳孔面積標準値の平均値が1.0となるように規格化した値を補正に用いることにした。規格化した標準値を相対瞳孔面積標準値とする。すなわち、

$$\text{補正後の相対瞳孔面積} = \frac{\text{相対瞳孔面積}}{\text{相対瞳孔面積標準値}}$$

である。この方法で求めた結果を図5-6に示す。補正後の結果を見ると、部分的には多少の変化をしているが、ほぼ明るさによる変化を取り除くことができたと考えられる。

さらに補正した結果について、精神活動と輝度の2つの要因が相対瞳孔面積にどのように関係しているかを調べるために分散分析を行なった。分散分析の結果を表5-3に示す。F検定の結果、課題については有意となり、瞳孔面積変化の要因となるが、輝度については有意とはならず、補正後の結果では輝度は瞳孔面積変化の要因とはならないことがわかる。また、両者の交互作用も要因とはならない。

これらの結果から先の補正の方法によって、瞳孔面積変化の要因のうち、輝度の要因による変化を取り除くことができ、取り除かれた後の瞳孔面積は、提示パターンに対する精神活動の指標になると結論できる。

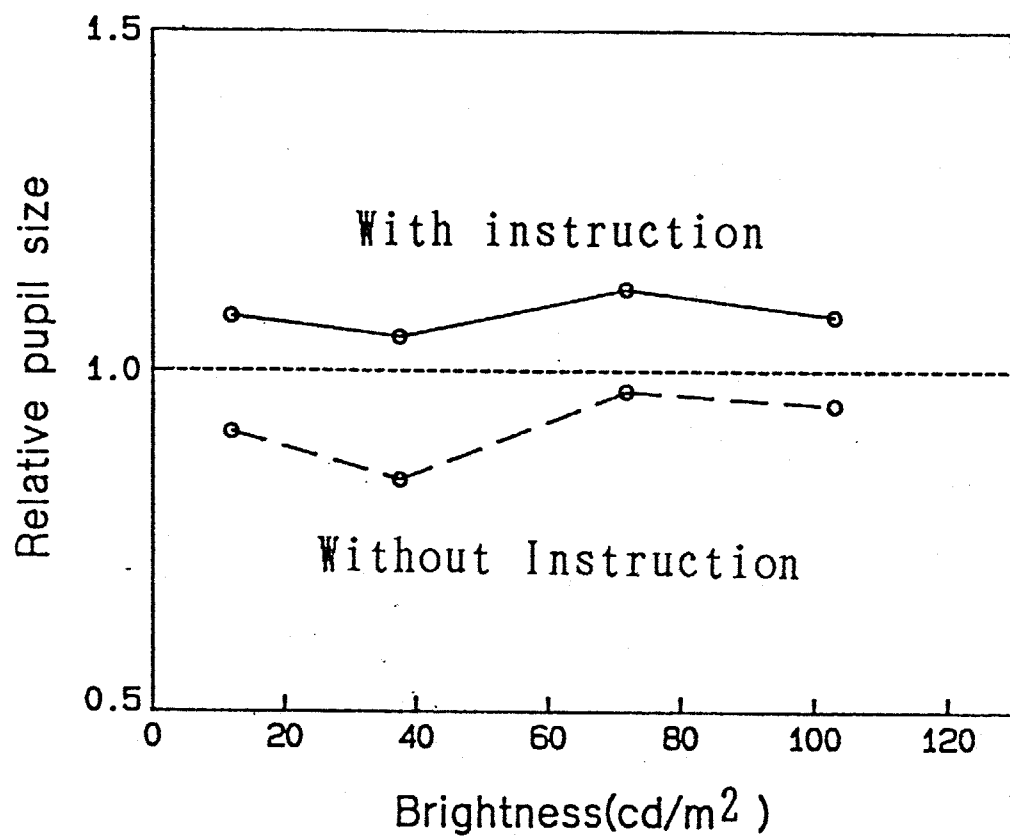


図 5 - 6 . 関数による補正後の結果

Fig. 5-6 A corrected results used the function.

表 5 - 3 . 補正後の分散分析の結果

Table 5-3. Results of two-way ANOVA in corrected :
Repeated measure by subject.

要 因	自由度	変動	分散	F
精神活動	1	0.29	0.29	10.5**
輝度の影響	3	0.06	0.02	0.8
交互作用	3	0.01	0.00	0.1
e	40	1.12	0.03	
	47	1.46	0.03	

** : F - 検定で 1 % 水準で有意

5. 4 瞳孔面積変化による提示画像の評価

前節までの結果より、提示パターンへの興味の要因だけに着目した画像の評価が行えるかどうかを調べた。すなわち、まず被験者に輝度一定の各種のパターンを提示し、それぞれのパターンに対する興味の度合を測定した。次に同じパターンの輝度を5段階に変化させて提示し、その時の瞳孔面積から輝度による変化分を取り除き、両者を比較した。

5.4.1 実験方法

瞳孔面積変化の要因が興味だけとなる基準データを得るために、提示パターンの輝度がすべて一定値 (110cd/m^2) である25枚の写真をビデオテープに収録した。次に輝度と興味による瞳孔面積変化を測定するために、同じ25枚の写真を5枚ずつ5つのパターン群に分け、群ごとに輝度を5段階、60、85、110、135、 160cd/m^2 に変化させ、しかも輝度一定の時とは提示順序を変えてテープに収録した。

提示パターンに用いた写真は普通のスナップ写真(11枚)、女性の写真(5枚)、風景写真(9枚)の3種類を選んだ。また5段階の輝度に対応したパターン群は、その内容がほぼ同じになるよう留意して分類した。

次に提示方法は図5-7に示すように最初、輝度が一定のパターンを37型ビデオモニタで被験者に連続的に見せ、1時間程度休憩した後に、輝度を5段階に変化させたパターンを提示した。パターンの提示時間は10秒、パターン間にはインターバルをおかずに連続的に提示した。瞳孔面積の評価方法は、パターンが変わった直後は前のパターンの影響が瞳孔面積に出るので、パターン提示から最初の3秒間を無視した後半の7秒間の瞳孔面積値を、各被験者ごとに全パターンの平均瞳孔面積で規格化した相対瞳孔面積で評価した。

また、被験者は実験を開始した直後のパターンにより興味を持つため、瞳孔面積にも反映されることが経験的にわかっている。そこで、輝度一定時と輝度変化時の提示に際して、それぞれ最初の2パターン(合計4パターン)をダミーのパターンとして提示した。尚、ダミーのパターンは提示パターンと同様の内容である。

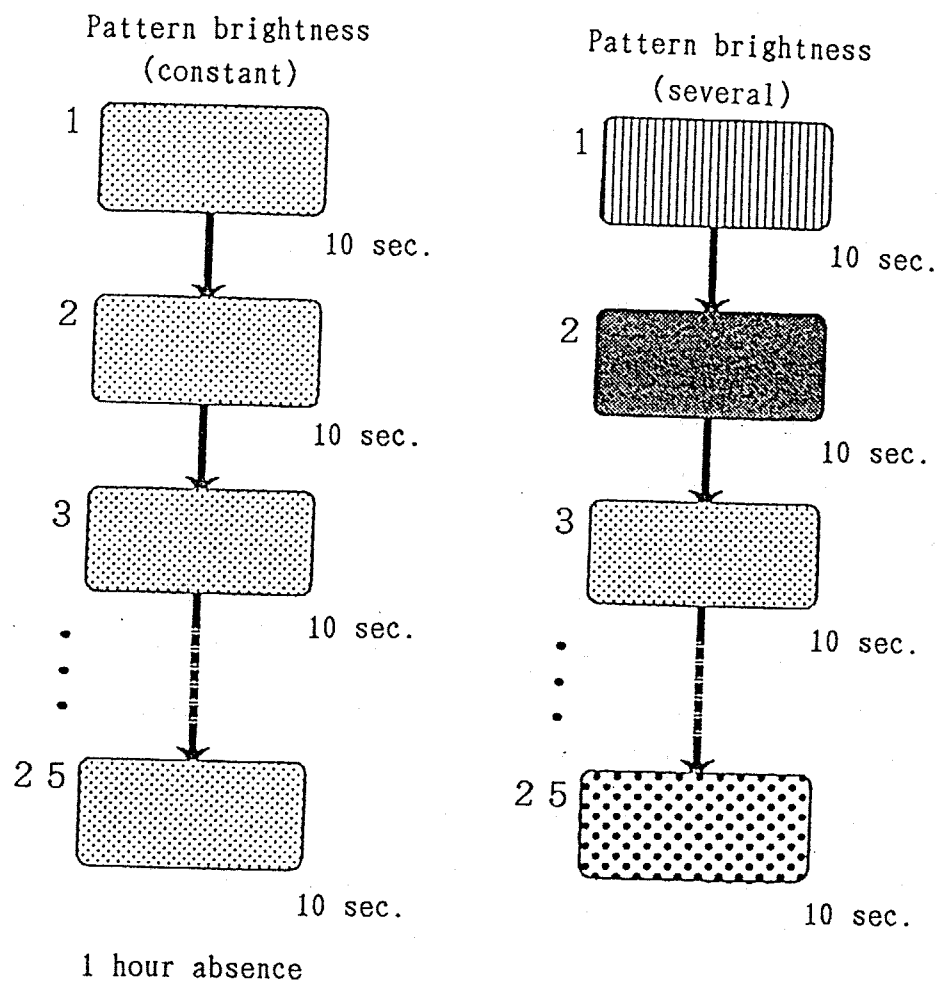


图 5-7. 提示方法

Fig. 5-7 Experimental procedure.

5.4.2 実験結果

先に述べたパターン群を輝度を一定にして提示した場合と輝度を変化させて提示した時の相対瞳孔面積の結果を図5-8に示す。図中の○印は輝度、 110cd/m^2 で提示した時の全被験者6人の結果である。相対瞳孔面積は各パターン群ともほぼ一定であるが、多少の違いがあるのは、各パターン群に対する被験者の興味の持ち方に違いがあるためと推察される。これに対して図中の×印は図の上側の軸に示すように同一のパターン群の輝度をそれぞれ60、85、110、135、 160cd/m^2 とした時の結果である。輝度が高くなるに従って、瞳孔面積が小さくなっていることがわかる。同一のパターンを2回提示した場合、2回目のパターンに対する興味の持ち方は1回目と比較して低下することが経験的にわかっているが、今回の実験では、被験者には1時間の休憩を与えているので、輝度一定で提示した時と輝度を変化させた時のパターンに対する興味の程度はほぼ同程度であると考えられる。これは図5-8で2回の提示とも 110cd/m^2 で提示したパターン群の相対瞳孔面積の値が2回ともほぼ同じであることから説明できる。

それぞれのパターンに対する相対瞳孔面積の結果を表5-4に示す。表5-4では各パターン毎に輝度一定時、輝度変化時を、瞳孔面積の大きい順番に並べている。すなわち、それぞれのパターンの瞳孔面積は輝度とパターンに対する興味による大きさである。表中で◎がついているパターン番号は女性の写真、△は風景、無印はスナップ写真のパターンであることを示している。

これらの結果を基に、前節で決定した補正方法によって、各被験者の相対瞳孔面積を補正した結果を表5-4に示す。輝度一定時のパターンの順位と相対瞳孔面積の補正前後の順位を比較すると、補正後の方が輝度一定のときの結果に近いことがわかる。

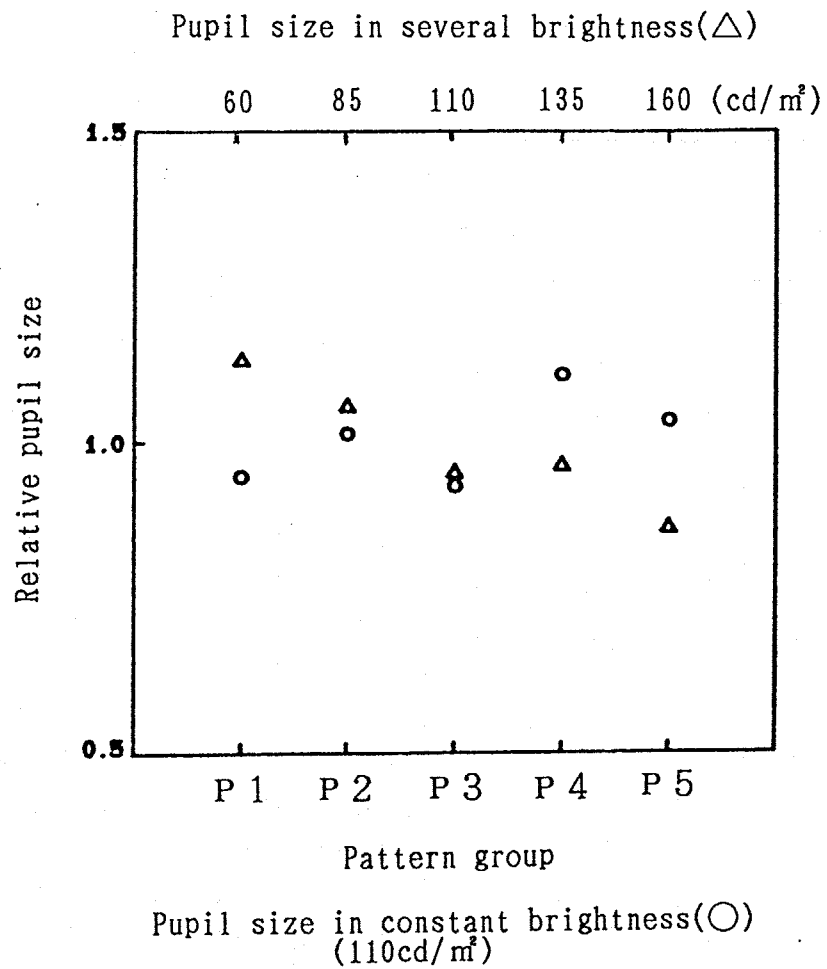


図 5 - 8 . 輝度一定時と輝度変化時の瞳孔面積

Fig. 5-8 Pupillary changes in response to two sets of patterns
with constant and variable brightness.

表 5 - 4 . 補正前、補正後の瞳孔面積比較

Table 5-4. Comparison between experimental and corrected pupil size.

輝度一定		輝度変化（補正前）		輝度変化（補正後）	
No,	相對瞳孔面積	No,	相對瞳孔面積	No,	相對瞳孔面積
△ 6	1. 196	◎ 9	1. 195	△ 6	1. 189
◎13	1. 141	△23	1. 134	21	1. 155
10	1. 107	8	1. 124	◎13	1. 151
◎12	1. 105	△17	1. 122	19	1. 086
8	1. 103	5	1. 105	8	1. 062
14	1. 099	◎ 3	1. 096	4	1. 044
16	1. 061	△15	1. 095	◎20	1. 043
1	1. 048	1	1. 089	◎ 3	1. 036
◎ 9	1. 044	△24	1. 082	◎ 9	1. 034
◎ 3	1. 029	△ 6	1. 081	1	1. 029
21	1. 025	19	1. 061	◎12	1. 027
△25	1. 021	◎13	1. 046	11	1. 022
11	1. 016	4	1. 020	10	1. 012
19	1. 005	◎20	1. 019	△18	1. 007
◎20	. 991	16	. 988	14	1. 001
5	. 984	21	. 983	△23	. 981
4	. 983	△22	. 941	△17	. 970
△23	. 983	11	. 929	△22	. 964
△15	. 972	14	. 910	5	. 956
△18	. 941	◎12	. 874	△15	. 947
△17	. 892	10	. 862	△24	. 936
△22	. 833	△ 7	. 861	16	. 934
△ 7	. 831	△18	. 857	△25	. 858
△ 2	. 816	△ 2	. 797	△ 2	. 816
△24	. 774	△25	. 730	△ 7	. 814

◎：女性の写真、△：風景の写真、無印：スナップ写真

補正によって、輝度一定時の結果にどれだけ近づけたかを評価するために、相対瞳孔面積値と、瞳孔面積によるパターンの順位についてそれぞれピアソンの相関係数とスピアマンの順位相関係数を求めた。すなわち、補正によって輝度一定時の相対瞳孔面積に完全に補正できたとするとそれぞれの相関係数が1.0となる。

被験者の平均について補正後と輝度一定時の相対瞳孔面積との関係を図5-9に示す。両者の相関係数は表5-5の被験者平均の欄に示すように、 $r = 0.68$ である。補正前では $r = 0.15$ であることから非常に高いレベルで補正されたことになる。また、瞳孔面積によるパターン順位の順位相関係数についても、補正する前では $r = 0.07$ が補正によって $r = 0.60$ となり、興味の順位も輝度一定時の結果に近づくことがわかる。被験者全体、各被験者の相関係数、順位相関係数を見ると、補正することによってそれぞれの相関係数が高くなっている。すなわち、輝度一定時と輝度変化時の相対瞳孔面積の間には相関関係はないが、輝度変化時の結果を補正すると、両者の間には相関関係があることが分かる。また瞳孔面積によるパターンの順位の順位相関係数についても同様である。各被験者単独では、ばらつきのために相関係数はそれほど高くないが、被験者全体、被験者平均ではそれぞれの相関係数は高くなっている。

以上の結果から、この補正により輝度の異なる画像の評価を行えるものと考えられる。

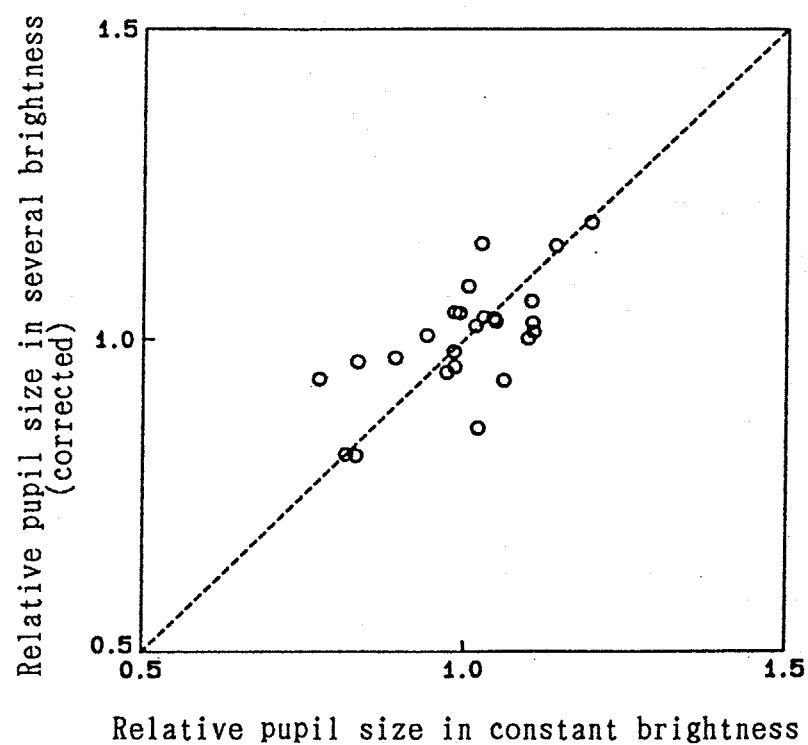


図 5 - 9 . 輝度一定時の瞳孔面積と補正された輝度変化時の瞳孔面積との関係

Fig. 5-9 Relations of pupil size at constant brightness and corrected pupil size.

表 5 - 5 . 各被験者の相関係数と順位相関係数

Table 5-5. Correlation and rank correlation coefficients of
experimental and corrected pupil size in each subject.

	相関係数 (r) (有意性)		順位相関係数 (r) (有意性)	
	補正前	補正後	補正前	補正後
被験者全体 (N=125)	0. 1 9 (0.02)	0. 5 1 (0.00)	0. 1 7 (0.03)	0. 5 1 (0.00)
被験者 1 (N=25)	0. 2 8 (0.09)	0. 7 5 (0.00)	0. 2 8 (0.09)	0. 7 5 (0.00)
被験者 2 (N=25)	0. 2 2 (0.14)	0. 5 6 (0.00)	0. 2 2 (0.15)	0. 5 8 (0.00)
被験者 3 (N=25)	0. 2 8 (0.09)	0. 5 8 (0.00)	0. 1 4 (0.25)	0. 4 5 (0.01)
被験者 4 (N=25)	- . 1 2 (0.28)	0. 2 6 (0.11)	- . 0 7 (0.38)	0. 3 1 (0.06)
被験者 5 (N=25)	0. 2 7 (0.10)	0. 4 9 (0.01)	0. 2 7 (0.10)	0. 4 4 (0.00)
被験者平均 (N=25)	0. 1 5 (0.24)	0. 6 8 (0.00)	0. 0 7 (0.37)	0. 6 0 (0.00)

5. 5 まとめ

以上本章の実験では、瞳孔面積によって映像などの評価を行なおうとする時、輝度による変化量を取り除く必要があるので、輝度と精神活動による瞳孔面積変化について検討した結果、以下のことが明らかになった。

- ① 輝度と精神活動は両方とも瞳孔面積に影響を与えるが、精神活動による瞳孔面積の変化率は、輝度に関係なくほぼ一定である。
- ② 瞳孔面積変化の要因である輝度と精神活動はそれぞれ独立であることが分散分析の結果からわかった。
- ③ 輝度と瞳孔面積の関係を検討した結果、実験値との差の二乗和が小さくなる実験式を導き、この実験式を用いて、補正を行なうことによって、輝度による瞳孔面積変化が取り除けることが分散分析の結果からわかった。
- ④ 輝度の要因と興味によるものを分離し、興味だけに基づく瞳孔面積変化により映像の評価が行えることを示した。

本章における実験の今後の課題として、テレビ画面の輝度の変化領域は測定可能であるので、その輝度範囲での輝度に対する瞳孔面積の変化を調べ、事前に提示パターンの輝度を測定しておくことによって、被験者にパターンを1回提示するだけで、映像の評価が行なえるかどうかを検討するとともに、パターンの提示間隔を変化させて、動画の評価も同様に行なえるかを検討することである。

第 6 章

音環境が与える音読速度への影響と 瞳孔面積変化

6. 1 はじめに

本章では学習環境としての音環境を眼球運動によって評価を試みた。

近年、学習者の学習するスタイルも大きく変わり、音楽などを聞きながら勉強する、いわゆる「ながら勉強」という言葉も定着した。しかし、これらの影響についての具体的な測定結果はあまり示されていない。

学習者集団の学習環境としての音環境は学習能率等に大きな影響を与えるため、学校建築における教室形状や大きさなどといった空間的環境に対する考察[30]とともに考慮しなければならない点である。学習者個人の学習時においては、学習者の好みによって、環境を選ぶことができ、その環境に慣れることによってある程度の能率を維持しているものと考えられる。さらに、それぞれの環境は学習者の学習意欲にも大きく影響を与えられられる。しかし、その能率や学習意欲については明らかでない。

学習時における学習者の学習意欲は、その学習能率・効果に大きく関係するが、学習者の学習意欲を明確に把握することはむずかしい。しかし、学習者の瞳孔面積変化は学習者のアクティビティを反映して変化をするので、瞳孔面積変化を学習者の学習意欲の指標とすることができると考えられる。

そこで本章の実験ではテレビ画面に提示された平仮名文を音読する課題を被験者に与えたとき、無音、BGM音、テレビのCM音、雑音の4種の音環境下での音読速度の違いを調べ、音環境が音読するという学習能率に与える影響を調べた。さらに学習者の意欲の指標としての瞳孔面積も同時に測定し、音環境の違いによる学習者のアクティビティの変化や音環境の音圧の影響についても調べた。

6. 2 実験方法

平仮名文の提示パターンを瞳孔面積測定装置を付けた被験者に見せ、一定時間（10秒）に音読できる文字数と瞳孔面積の変化を調べた。

6.2.1 提示パターン

提示パターンはビデオタイプライター（SONY：SMC-70）を用いて作成した。パターンは青地に黒の縁取り付き白文字で数字を含む平仮名で横書きで記述したものである。1パターンは1例を図6-1に示すように、16文字×8行の128文字で構成されている。文章の出典は高等学校の教科書[31]にも載せられている湯川秀樹氏の「自己発見」である。この文章はセンテンスが比較的短く、大変読みやすいという理由から選んだ。この随筆を全体の意味が分かるように、全文を31パターンに分けた。パターンを平仮名で記述した理由は、日本語読語過程の研究において平仮名より漢字の方が、

①視覚的分析が多少困難である、

②音韻的符号化の速度が遅い、

にんげんはどうしたらそうぞうてきに
いきられるのか、いきつつけられ
るのか。わたしはじぶんにむかって
こういうといかけを、ながねんにわ
たてくりかえしてきた。このとい
かけがはじまったのはこうこうせい
のころからだったが、それにたいし
てなにほどかのじしんをもってこた

図6-1. 提示パターンの例

Fig. 6-1 An example of visual pattern.

などの指摘があるので[32]、本章の実験においては1パターン中に含まれる漢字の数が実験結果に影響を与えると考えたためである。このパターンを提示用のビデオテープとして編集した。31のパターンを、原文の順番に3秒間の青地のブランクパターンを入れながら10秒ずつビデオテープに録画した。

6.2.2 提示方法

先に述べたビデオテープを37型のテレビに再生・提示し、これより1.5m離れたところに瞳孔面積測定装置をつけた被験者をおいた。後に述べる音環境の与え方は、4パターンずつ同じ音環境を与えた。音は37型のテレビの両側に設置したスピーカより流した。これらの音環境の下で、できるだけ速く音読することを被験者に課題として与え、被験者が集中して読むように、実験終了後内容に

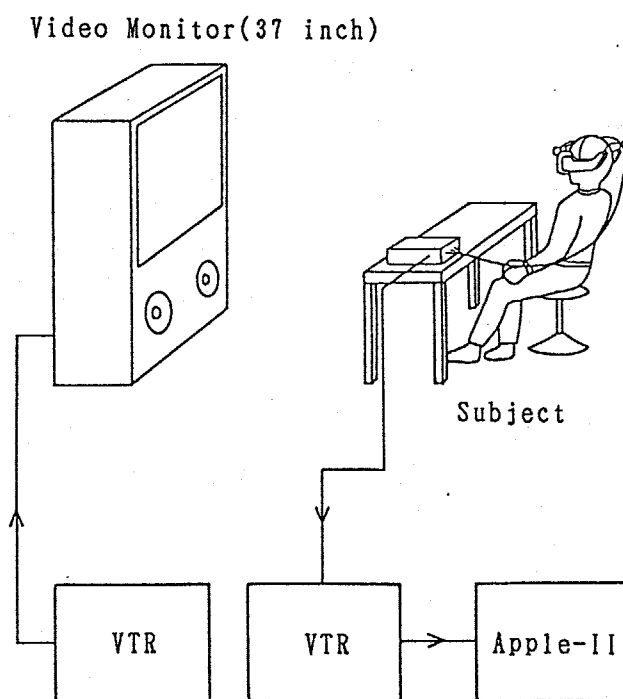


図6-2. 実験の形態

Fig. 6-2 Diagram of experimental setup.

関するテストを行なう旨を告げた。被験者への実験の内容の説明は、統一的にするため、あらかじめ用意した印刷物を示して黙読させた。実験中、被験者の提示パターンを読んでいる視点を捉えた映像と瞳孔の映像を、被験者の音読する音声と共に同期させたVTRでビデオテープに記録し、実験後、分析を行なった。このパターンの総提示時間は約7分である。これを被験者1人に対して、計3回行なった。実験の形態を図6-2に示す。

6.2.3 音環境条件

本実験では、学習時に影響されると考えられる音環境として、次の4つの条件をとりあげた。

- ①無音：静かな環境条件
- ②BGM：バロックのBGMを与える条件。
- ③CM音：テレビで放映されているCM音を与えた条件。

(パターンの内容と全く関係はない)

- ④雑音：ホワイトノイズを与える条件。

このうち②～④は騒音計で測定して、被験者に聞かせる音圧レベルが一定(70dB)となるようにした。これらの音環境の設定の理由としては、②は音楽を聞きながらの学習を、③はテレビ、ラジオなどを聞きながらの学習を、④は騒音の中での学習を想定している。31パターン中、無音、BGM、CM音は各8パターンずつ、雑音は文章の都合上から7パターンである。

6.2.4 音読速度の測定

実験では10秒間では全部読み終えないと想定していたが、人により10秒以内で読み終える場合もあった。そこで、ここでの音読速度は1秒あたりに読むことが可能な文字数であらわすことにした。これは提示時間に関係なく、アイコンと呼ばれるものに視覚的情報をもとの形態のままで短時間保持し、報告可能であることが示されているため[33]、10秒を超えて音読した場合は、この時すでに提示パターンが消えているにもかかわらず、被験者の視点は文末まで達していることを意味するからである。

実験の前に簡単な調査をしますので気軽に答えて下さい。

被験者名

調査

以下の質問項目に答えて下さい。ただし答えは1～4の数字に○を付けて下さい。
(中間値はありません)

1 : はい、2 : どちらかと言えば、はい、3 : どちらかと言えば、いいえ
4 : いいえ

	yes			no
	1	2	3	4
1. ふだん音楽などを良く聞く方である。	_____	_____	_____	_____
2. ふだんテレビなどを良く見る方である。	_____	_____	_____	_____
3. ふだん騒がしい所に居るのが好きだ。	_____	_____	_____	_____
4. ふだん静かな所に居るのが好きだ。	_____	_____	_____	_____
5. 音楽はクラシックを好む。	_____	_____	_____	_____
6. 音楽はジャズを好む。	_____	_____	_____	_____
7. 音楽はポピュラーを好む。 (含歌謡曲等)	_____	_____	_____	_____
8. 音楽は静かな曲調のものが好きだ。	_____	_____	_____	_____
9. 音楽はにぎやかな曲調のものが好きだ。	_____	_____	_____	_____
10. 音楽はまったく嫌いである。	_____	_____	_____	_____
11. ふだん勉強するとき、音楽などを聞きながらするのが好きだ。	_____	_____	_____	_____
12. ふだん勉強するとき、テレビなどを見ながらするのが好きだ。	_____	_____	_____	_____
13. 何か作業をするとき、テレビなどを見ながらするのが好きだ。	_____	_____	_____	_____
14. 騒がしくても、読書や勉強はできる方である。	_____	_____	_____	_____
15. 騒がしくないと、読書や勉強はできない方である。	_____	_____	_____	_____
16. 静かな状況でも、読書や勉強はできる方である。	_____	_____	_____	_____
17. 静かな状況でないと、読書や勉強はできない方である。	_____	_____	_____	_____
18. どちらかと言えば、生まじめな方である。	_____	_____	_____	_____
19. 物事に対して集中できる方である。	_____	_____	_____	_____

図 6 - 3 . アンケート用紙

Fig. 6-3 Questions on favorite acoustic circumstances.

6.2.5 被験者に関する調査

被験者は東京工業大学の学生13人である。被験者が日頃どのような音環境に慣れているかは、実験結果に大きな影響を与えると考えられる。例えば、日常的に音楽を聞きながら読書をする被験者においては、無音の条件もBGMがある条件もほぼ等価な条件と考えられるからである。

そこで、図6-3に示すようなアンケート調査を行ない、被験者が日頃慣れている音環境を推測した。調査項目に対する回答は全て4選択肢とした。これは回答の中心化傾向[34]を避けるためである。また簡単なインタビューを行ない、被験者自身の感想も聞いた。

6.3 実験結果

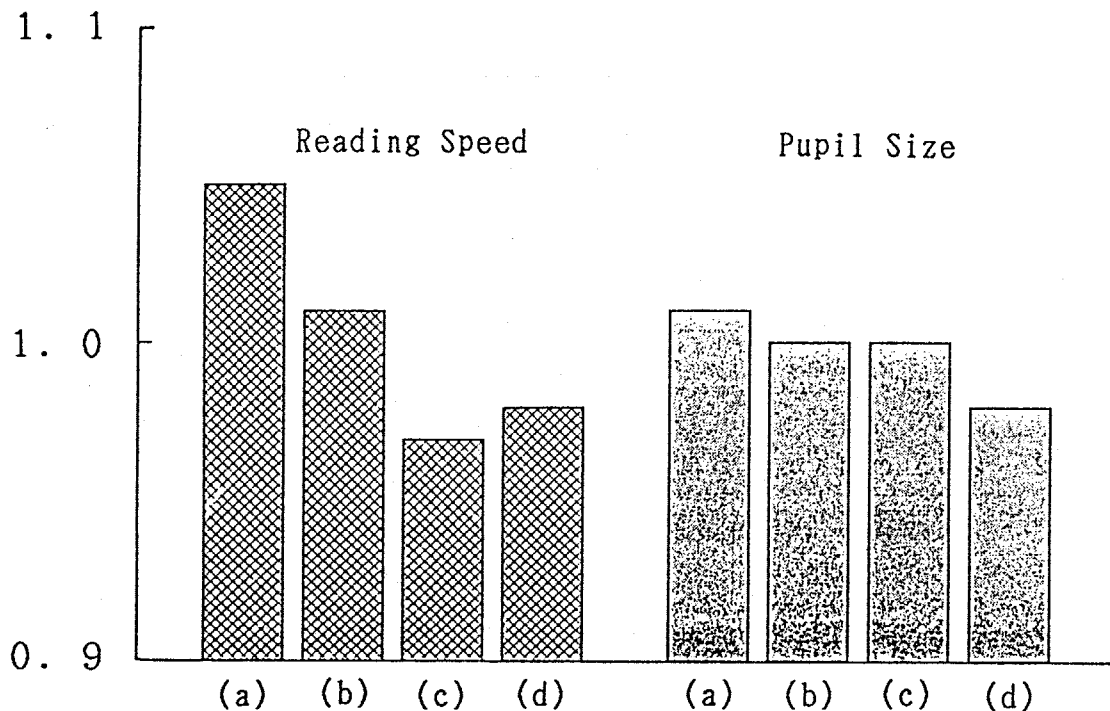
6.3.1 音読速度の結果

音読速度は各被験者によって読む速さそのものが異なるので、各被験者ごと、1～3回ごとに平均を求め、これを1.0とする規格化を行なった後に集計した。規格化した値を相対音読速度と定義する。その結果を図6-4に示す。この図より、音読速度のついては、無音の条件での音読速度が最も速く、CM音の条件での音読速度が最も遅いことがわかる。

各音環境による影響の違いを見るためt検定を行なった。その結果を表6-1に示す。表中の◎は、例えば無音の条件とBGMの音環境における相対音読速度に1%水準で有意な差があることを示している。この表からわかるように、相対音読速度については、無音の条件と他の音環境との間にいずれも1%水準で有意な差があり、何等かの音が聞える環境は音読速度を低下させる。またBGMとテレビのCM音や雑音は音読速度の点から見ると異なる音環境であり、CM音と雑音はほぼ同様な音環境であることがわかる。

6.3.2 瞳孔面積の結果

瞳孔面積についても音読速度と同様に各回ごとに平均を求め、これを1.0とする規格化を行なって評価した。規格化した瞳孔面積を相対瞳孔面積と定義する。



Results of reading speed and pupil size under conditions:
 (a) without sound, (b) with BGM sound, (c) with TV commercial,
 (d) with white noise.

図 6 - 4 . 音読速度と瞳孔面積の結果

Fig. 6-4 Reading speed and pupil size under each condition.

瞳孔面積については音読速度のように顕著な違いは見られないが、無音の条件での瞳孔面積がやや大きく、雑音の音環境での瞳孔面積がやや小さくなっている。各音環境の違いを調べるため t 検定を行なった。その結果を表 6 - 2 に示す。雑音の音環境と他の音環境との間にすべて 1 % 水準で有意な差が得られた。このことから瞳孔面積変化からみると、雑音の条件と他の条件は音環境が異なることがわかる。また無音と CM 音も異なっていることがわかる。

表 6 - 1 . 音環境による音読速度の t 検定の結果

Table 6-1. Results of t-test to reading speed.

	(a)	(b)	(c)	(d)
(a)無 音		◎	◎	◎
(b)B G M			◎	▲
(c)C M 音				
(d)雑 音				

◎ : 1 %水準 ○ : 5 %水準

▲ : 10%水準

表 6 - 2 . 音環境による瞳孔面積の t 検定の結果

Table 6-2. Results of t-test to pupil size.

	(a)	(b)	(c)	(d)
(a)無 音			○	◎
(b)B G M				◎
(c)C M 音				◎
(d)雑 音				

◎ : 1 %水準 ○ : 5 %水準

▲ : 10%水準

6.3.3 音読速度と瞳孔面積の関係

音読速度と瞳孔面積の関係を明らかにするため、結果を図6-5にまとめた。この図では、縦軸は瞳孔面積、横軸は相対音読速度である。各音環境ごとに先に述べた全体の平均をプロットし、その標準偏差も示した。

無音の条件での結果が相対音読速度、相対瞳孔面積の両方とも最も高いことから、学習能率が最も高く、学習意欲も高まるのは無音の条件である。

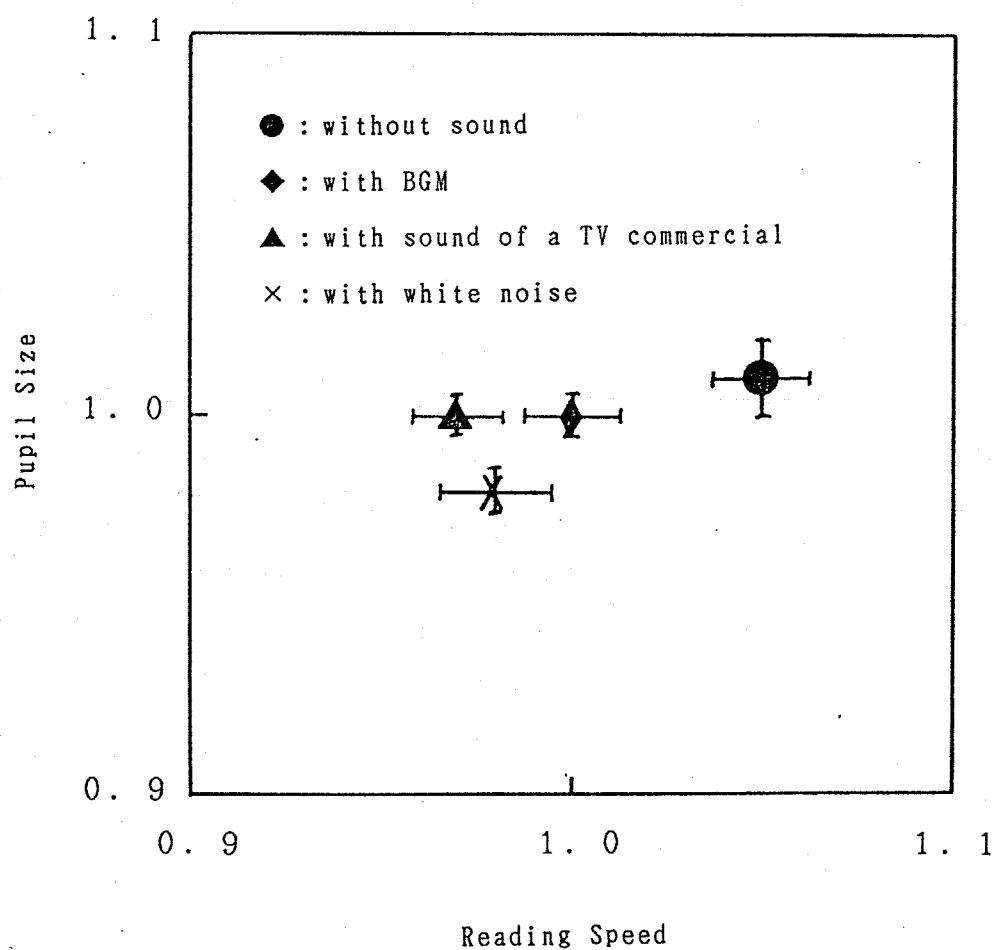


図6-5. 音読速度と瞳孔面積

Fig. 6-5 Relation of reading speed and pupillary changes.

音読速度においてCM音の音環境の結果が最も低いことについては次の様に考えられる。音読することは目で捕えた文字の像を音韻的符号に変換していくことであるが、CM音には音楽だけでなく、ナレーションも含まれている。このため、このナレーションが文字像を音韻的符号化することを阻害するために音読速度が遅くなると考えられる。これは実験後の被験者へのインタビューでも、BGM音や雑音よりもCM音、とくにCMのナレーションが気になる、との同様の意見が得られた。

瞳孔面積の結果では音読速度の結果と異なり、最も小さくなる音環境は雑音の条件である。音環境を心理的な面で考えると、雑音の音環境はかなり不快なものに感じられる。瞳孔面積は快なものに対してはポジティブな反応を、不快なものに対してネガティブな反応をすることがすでに知られている[10]。このため、雑音の不快さに対する反応と考えることができ、同時に学習意欲も低下しているものと考えることができる。

6.3.4 被験者の特性との関係

実験方法で述べたように被験者が日頃どのような音環境に慣れているかによって個人の結果は異なる。そこで各個人の音環境に対する特性との関係を調べた。調査した19項目の中から次の特性を選び、今回実験した4つの音環境に対応した特性をつぎの4つの指向項目として定義した。

- ① 静寂指向：静かな状況を好む項目、4項目。
- ② 音楽指向：音楽を聞きながら勉強などすることを好む項目、5項目。
- ③ テレビ指向：テレビを見ながら勉強などをするを好む項目、7項目。
- ④ 騒音指向：騒がしい状況を好む項目、4項目。

いずれも、被験者が選んだ4選択肢に1～4の重みづけをし、その重みの和をそれぞれの特性の指向のスコアとした。このそれぞれの特性のスコアと相対音読速度、相対瞳孔面積との間の相関関係について調べた。

相対音読速度と4つの特性との間の相関係数を求めた。その結果を表6-3に示した。この表では相関係数 r の有意性が10%を超える相関係数については()内に示した。表からわかるように、音楽指向、テレビ指向、騒音指向とBGMの音環境での相対音読速度との間には正の相関係数が、音楽指向、テレビ指

表 6 - 3 . 音読速度と被験者の特性との相関係数

Table 6-3. Correlation coefficient of reading speed and

被験者の 特性項目	音読速度			
	無音	B G M	C M 音	雑音
静寂指向	(-.13)	(.11)	(.22)	(.00)
音楽指向	(-.08)	.41	-.43	(.13)
テレビ指向	(.13)	.41	-.48	(-.20)
騒音指向	(.02)	.49	(-.32)	-.49

向と C M 音の音環境との間と、騒音指向と雑音の音環境の相対音読速度との間には負の相関係数が得られた。このうち正の相関関係については、何等かの音のある音環境に慣れている被験者ほど、B G M 音が流れる音環境でも速く読むことができることを意味している。音楽指向やテレビ指向と C M 音の音環境での相対音読速度との負の相関は、先にも述べたように C M のナレーションが提示された文字の音韻的符号化を阻害するためであると思われる。B G M の音環境における音読速度との間での正の相関関係が、C M 音の音環境での音読速度との間で負の相関関係に転じたのは音楽に加わったナレーションによるものと考えられるからである。また、テレビ指向と C M 音の音環境での音読速度が、負の相関関係を示したことについては、実験後の被験者へのインタビューで、C M 音から放映されている映像が浮かんでしまう、との意見が得られており、テレビ指向の度合いが高いほど、C M の映像等が想起されて音韻符号化の速度が低下すると考えられる。騒音指向と雑音の音環境における音読速度との負の相関関係については、騒がし

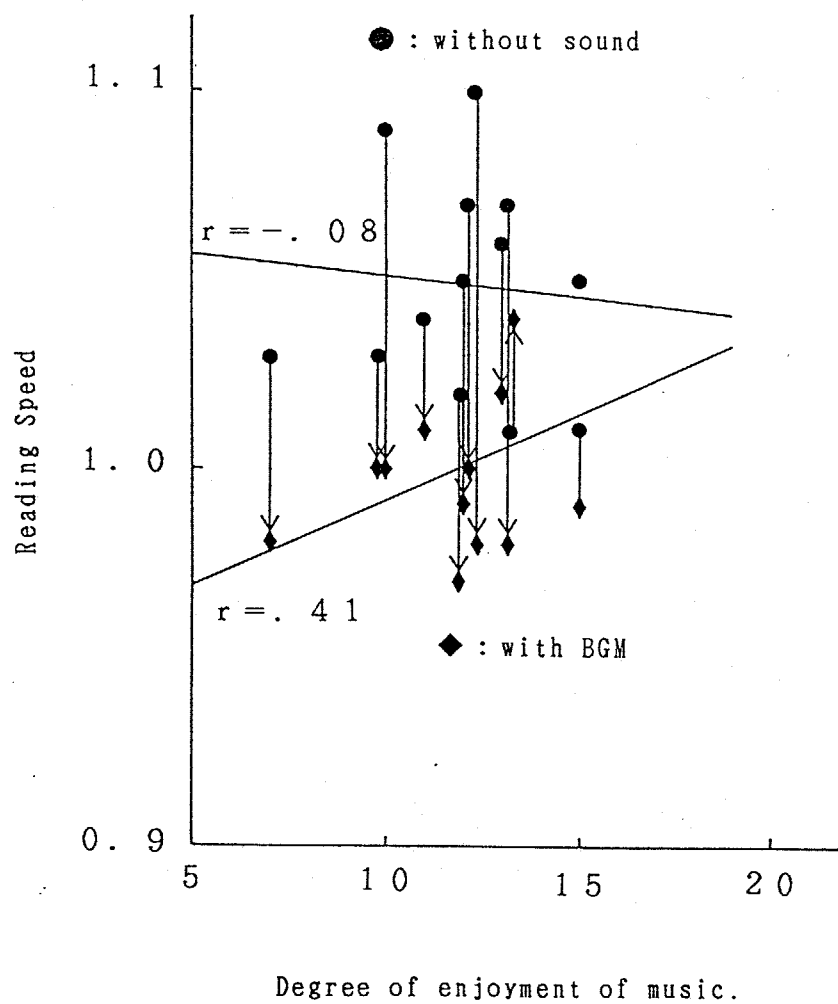


図 6 - 6 . 音楽指向と音読速度との関係

Fig. 6-6 Relation between the degree of enjoyment of music and reading speed.

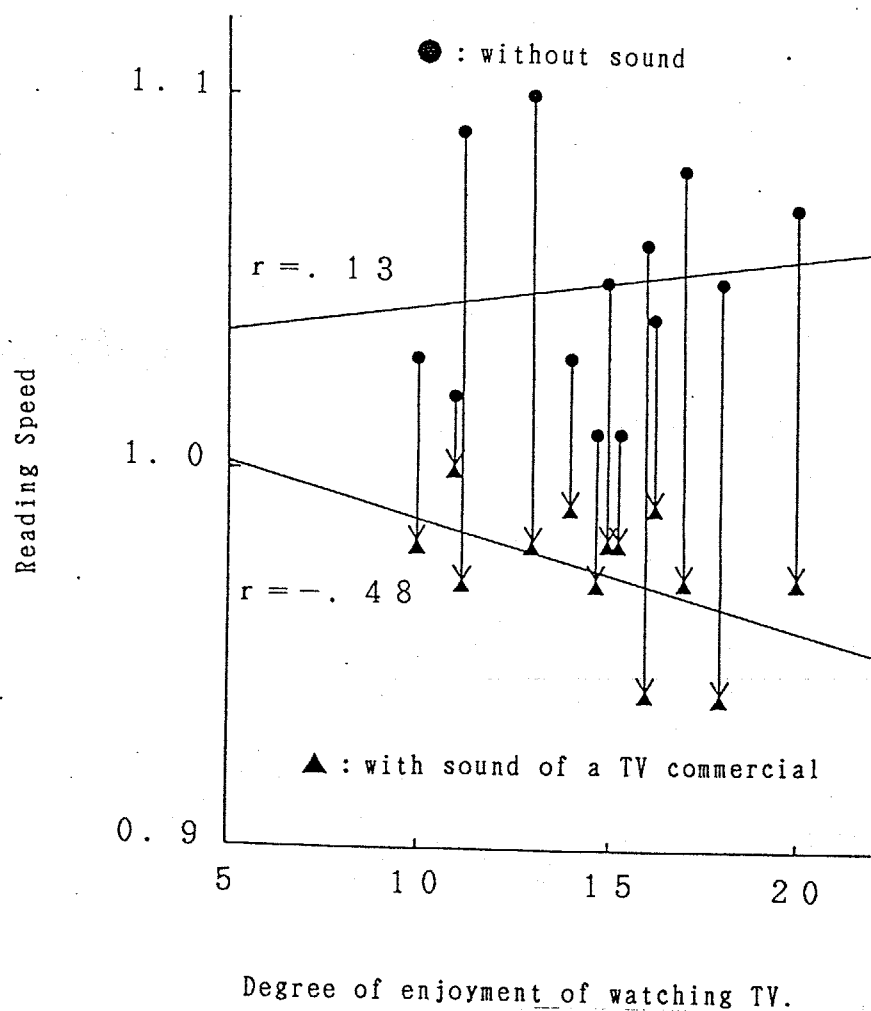


図 6 - 7 . テレビ指向と音読速度との関係

Fig. 6-7 Relation between the degree of enjoyment of watching TV and reading speed.

いのが好きな被験者ほど実際の能率は、あまり高くないことを意味しているものと考えられる。

これらの内容のうち典型的な結果を図6-6、7に示す。図6-6では横軸に音楽指向を、縦軸は相対音読速度である。無音の条件では音楽指向に関係なく相対音読速度はほぼ一定であるが、BGMが流れることによって相対音読速度が低下する。その低下の度合いは音楽指向が低い被験者ほど著しく音読速度が低下する。すなわちBGM条件での相対音読速度が音楽指向と正の相関関係となる。図6-7では横軸にテレビ指向、縦軸は相対音読速度である。無音の条件ではテレビ指向に拘らず相対音読速度はほぼ一定であるが、CM音の流れる条件ではテレビ指向の度合いの高い被験者ほど音読速度は低下する。その結果相対音読速度はテレビ指向と負の相関関係になる。

表6-4. 瞳孔面積と被験者の特性との相関係数

Table 6-3. Correlation coefficient of pupil size and subject's behavior under various acoustic conditions.

被験者の 特性項目	瞳孔面積			
	無音	BGM	CM音	雑音
静寂指向	(.01)	(.12)	(.01)	(-.14)
音楽指向	(.11)	(-.08)	(.35)	(-.25)
テレビ指向	(-.11)	(-.03)	(.31)	(-.09)
騒音指向	(-.05)	(-.13)	(-.08)	(.13)

相対瞳孔面積との相関係数も求めた。その結果を表 6 - 4 に示した。表からわかるように、いずれの環境での相対瞳孔面積と被験者の各特性との間には有意な相関係数は得られなかった。

6. 4 音圧の影響

6.4.1 実験方法

音圧レベルによる影響を調べるため、先に述べた 7 0 d B の実験に加えて、同様の実験を平均音圧レベル 6 1 d B と 7 7 d B において行なった。

提示パターンは同様な平仮名文のパターンで、文章の出典は以下の 2 つである。

①井上靖、「天上の星の輝き」[35] (平均音圧レベル 6 1 d B)

②加藤周一、「日本文化の雑種性」[36] (平均音圧レベル 7 7 d B)

本実験においてはそれぞれを被験者に対して 1 回ずつ行なった。被験者は東京工業大学の学生 1 0 人である。

6.4.2 実験結果

本実験での音読速度と瞳孔面積変化の結果と先に述べた実験結果の 1 回目の結果を用いて、すなわち 6 1 d B、7 0 d B、7 7 d B の音圧レベルによる影響を検討した。音読速度と瞳孔面積の評価については次の様に考えた。3 つの文章の読みやすさや被験者の実験に対する意欲は異なると考えられるので、それぞれの実験における無音の条件での音読速度と瞳孔面積を基準にとって評価した。

(1) 音読速度の結果

無音の条件での相対音読速度を 1. 0 として、これに対する 3 つの音環境での相対音読速度比を求めた。この相対音読速度比と音圧レベルとの関係を図 6 - 8 に示す。いずれの音環境における音読速度も音圧レベルが大きくなると音読速度が低下していることがわかる。このうち特に雑音の条件での音読速度が音圧レベルと共に大きく音読速度が低下している。また、BGM 音の条件での音読速度は音圧レベルによってあまり大きな低下はない。各音圧レベルにおける相対音読速

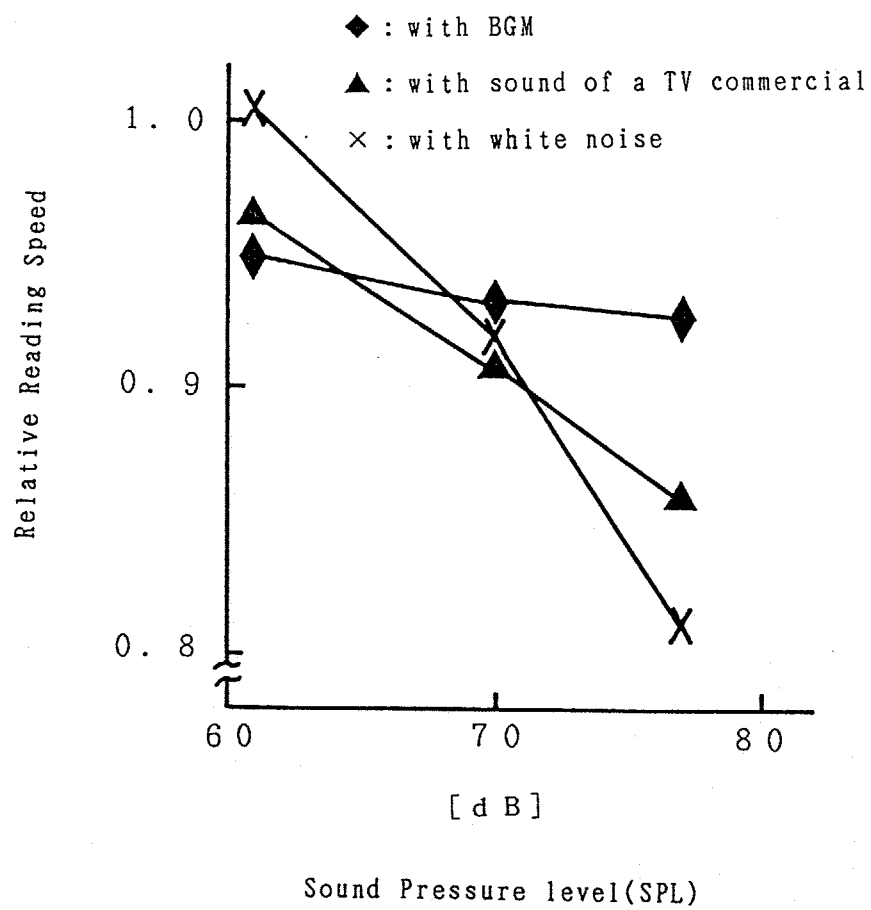


図 6 - 8 . 音圧レベルと音読速度との関係

Fig. 6-8 Relation between sound volume and relative reading speed.

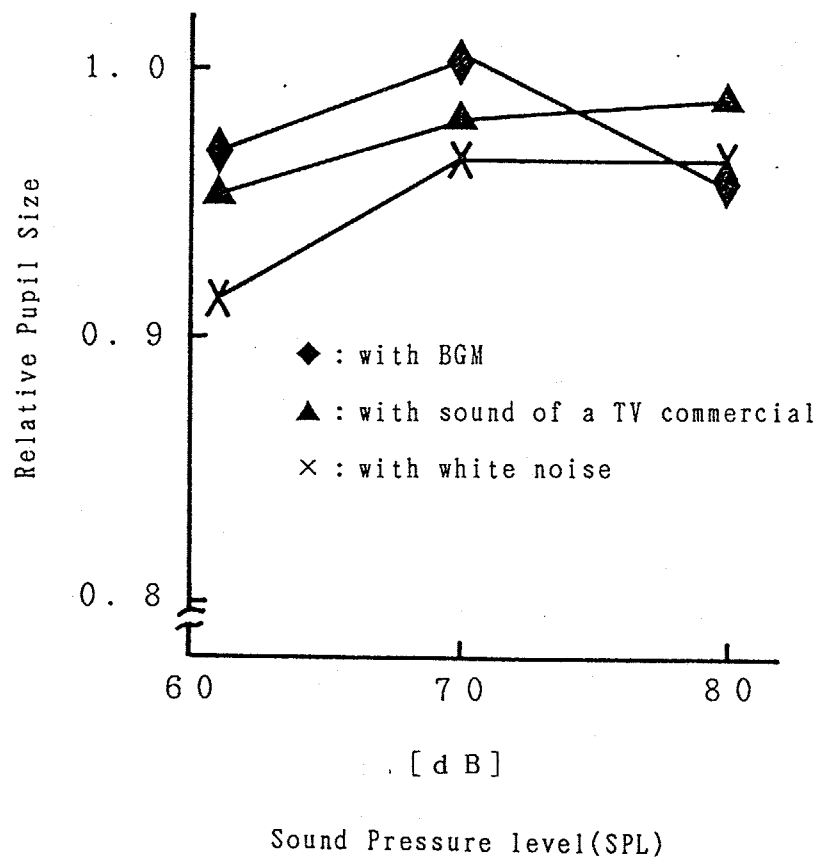


図 6 - 9 . 音圧レベルと瞳孔面積との関係

Fig. 6-9 Relation between sound volume and relative pupil size.

度比の差を t 検定で調べたところ、雑音の条件ではいずれの音圧レベルの間にも 5 % 水準で有意な差がある。CM 音の条件では 61 dB と 77 dB の相対音読速度比の間で 5 % 水準で有意な差があった。このことから雑音の音圧レベルが大きくなると音読速度が低下することがわかる。BGM 音ではいずれの音圧レベル間でも有意な差はない。このことから BGM 音の場合は音圧レベルによる著しい変化はないと考えられる。

(2) 瞳孔面積の結果

無音の条件での相対瞳孔面積に対する 3 つの音環境での相対瞳孔面積比と音圧レベルとの関係を図 6-9 に示す。瞳孔面積の場合は、先の音読速度とは違って、むしろ音圧レベルと共に増加している。この結果については、心的な負荷が大きいほど瞳孔面積が大きくなることが既に指摘されている[12]ことから、音環境の音圧レベルが増加するにつれて音読することの困難さが増すために、瞳孔面積が音圧レベルと共に増加すると考えることができる。しかし、こういった瞳孔面積の挙動はまだ不明な点が多く、今後の課題である。

6. 5 まとめ

本章の実験では無音、BGM、CM音、雑音の4つの異なる音環境において被験者に平仮名文を音読させる実験を行ない、学習能率として音読速度と学習意欲として瞳孔面積を調べた。さらにそれらの音圧の影響も調べた。その結果以下のことが明らかになった。

- ①学習能率が最も高く、学習意欲も高まるのは無音の条件であること。
- ②CM音のような言葉を含む音環境は、被験者の文字像を音韻的符号化することを阻害するため、音読速度は低下する。
- ③雑音のような不快と感ずる音環境は、学習意欲を低下させる。
- ④音楽指向、テレビ指向、騒音指向の高い被験者ほどBGM音が流れる音環境でも速く読むことができる。
- ⑤テレビ指向が高いほど、CM音の音環境では、CMの映像等が想起されて音読速度が低下する。
- ⑥雑音の音圧レベルが上がると共に音読速度は大きく低下するが、BGM音では音圧レベルが上がってもBGM音での音読速度はほとんど変化しない。
- ⑦音圧レベルが増加すると瞳孔面積は音圧レベルと共に増加する。

第 7 章

動画と静止画における 文字スーパーへの視点移動の違い

7. 1 まえがき

本章では提示映像の動画と静止画による違いを眼球運動によって調べた。

テレビジョンは我々の日常生活に欠かせないものになっており、また教育用としても多く利用されている。そしてテレビ映像をより効果的に提示するため、映像の解説を文章にして映像にスーパーインポーズすることはよく行なわれる手法である。例えば、リアリティを保つために外国人話者の映像と音声をそのまま再生し、話す内容を字幕で表わしたり、映像に主眼をおくためにあえて音声ではなく、文字スーパーでのみ解説したり、音声の補助的な役割を文字スーパーにさせるなど、その利用は教育用番組だけでなく、日常のテレビ番組の中でも数多く見られる。

ところで、この文章をスーパーインポーズすることは、その番組を見る人、すなわち学習者に対して、どのような効果をもたらすかは明らかにされていない。また、スーパーインポーズする時の背景になる映像は動画と静止画に大きく分けられるが、それぞれの効果も明らかでない。

解説文章を映像にスーパーインポーズした時、学習者はどのようにスーパーインポーズされた文章を読むのか、解説文章を映像にスーパーインポーズする場合、動画、静止画のいずれに対して提示した方がより効果的であるのか、動画と静止画によって文章を提示する時間をどのようにすべきなのか、などは非常に興味を持たれる点であり、これらのことが明らかになれば、教育用テレビ番組などで、効果的な映像の解説を行なうことができると考えられる。

本章の実験ではアイマークレコーダを用いた視点移動の測定によって、動画と静止画にスーパーインポーズされた文章について以下の2つの点について調べた。

- ①スーパーインポーズされている場合に、背景の映像に対する視点移動の違い。
- ②スーパーインポーズされた文章を読む速さの違い。

さらにそれぞれの映像に対する興味の度合いを調べるため、動画、静止画を見ている時の瞳孔面積も測定し、

- ③動画と静止画に対する瞳孔面積変化。

を調べ、静止画と同様に動画に対しても瞳孔面積が同様の変化をするかを検討した。本論文では第5章において、5段階の輝度についての分析を行なった。本実験では、輝度が連続量として変化した場合の結果について検討する。

そのため、あらかじめ提示するパターンをビデオテープで作成し、アイマークレコーダを装着した被験者に提示し、そのパターン提示中の視点移動を測定した。

7. 2 実験方法

7.2.1 提示パターン

文字スーパーは提示映像の解説であるので、関連ある連続したパターンに対する解説である方が、文字スーパーそのものの果す役割に近くなる。そこで提示パターンは全体としてストーリー性のある映像番組の中から選ぶこととし、スーパーインポーズする文章がその内容の解説になるようにした。また、パターンの作成上、動画と静止画を切出すため、映像番組のスチル映像が容易に再生できる媒体である必要がある。そのため、光ディスクに書込まれた番組を利用することにした。本実験では映像として、NHK制作の「NHK特集シルクロード」の番組[38]を選んだ。この番組はシルクロードに沿って各所を探訪するものであるので、今回の目的に比較的沿うものである。

この全体50分の番組の中から、全体の流れに従い、動画、静止画が交互に現れるようにして、計40シーンを選び、本実験用に編集した。ここで動画は番組から10秒間の長さを1つの提示パターンとして、合計20シーン切出したもので、静止画は途中の1シーンを静止画として10秒間提示するようにして20シーン選んだ。

解説に用いた文章は、番組中でナレーターが話している内容を書き取り、要約

して漢字仮名交じり文とし、1行あたり17文字の2行で記述した。文字はビデオタイプライター(ソニー:SMC-70G)を用いて作成し、黒の縁どり付きの白文字で表示した。スーパーインポーズする場所は画面の下部に横書きとした。これをタイムコードで制御できるビデオ編集機を用いて実験用番組を制作した。本実験に先立って予備実験を行ない、その結果から1シーンの提示時間は10秒とし、この内の6秒間、解説文章がスーパーインポーズされるように編集した。すなわち、1つのシーンについて提示後2秒後に解説文章がスーパーインポーズされ、6秒間解説文章が提示された後、さらに映像が2秒間続くようにした。この編集の方法は、文章がスーパーインポーズされる時間を正確にするため、スーパーインポーズ無しで、タイムコードと共に動画と静止画のシーンを1度編集した後、解説文章をスーパーインポーズした映像を所定の6秒間に入るようにインサートして、提示パターンを作成した。この実験用番組では、音声は記録されておらず、スーパーインポーズされた解説文章だけが、映像を説明している。解説文章をスーパーインポーズした画面の例を図7-1に示す。

7.2.2 提示方法

あらかじめビデオ編集によって作成した実験用番組を37型テレビで提示し、テレビより1.5m離れたところにアイマークレコーダ(ナック製:EMR-V型)を着けた被験者を座らせた。番組を見ている時の視点移動の映像と瞳孔の映像をタイムコードで同期させた2台のVTRで収録し、実験後のそれぞれの分析に用いた。この実験用番組の総提示時間は約7分である。

7.2.3 測定方法

本実験では以下のものを測定した。

- ①解説文章を読む時間
- ②解説文章提示中の視点移動
- ③解説文章提示中の瞳孔面積

解説文章を読む時間は、スーパーインポーズした解説文章について、被験者の視点が文頭から初めて文末までに至る時間をそれぞれのパターンについて測定した。視点は文章を読んで理解する場合、チャンクと呼ばれるセグメント単位の中

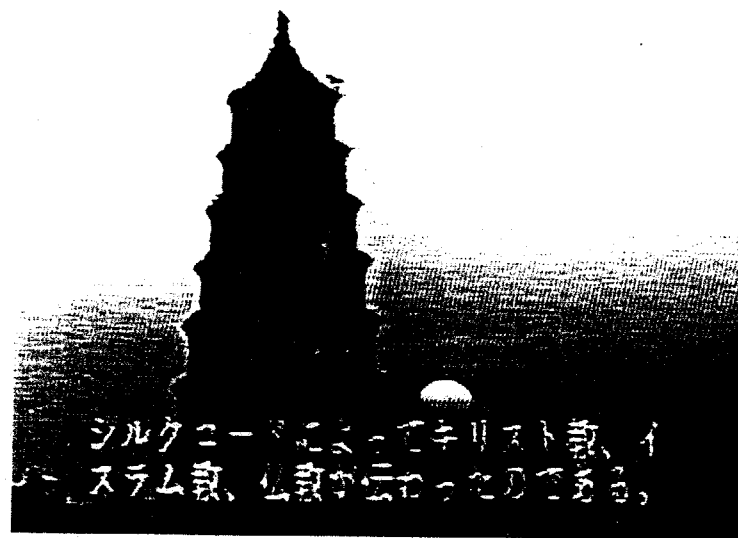


図 7 - 1 . 提示パターンの例

Fig. 7-1 A sample of visual patterns.

で、あるいは前のセグメントへの読み戻りがある[37]。そのため、映像や文章によって、文末にまで到達する時間は変化する。また、その視点移動はミリ秒単位である。しかし、視点の計測はビデオのNTSC方式の映像によっており、 $1/30$ 秒単位でしか測定できない。測定はビデオテープを再生し、それぞれのタイムコードを読み $1/30$ 秒の単位で測定し、動画、静止画における時間を比較した。

視点移動については、今回使用したアイマークレコーダ（ナック：EMR-V）から出力される視点の相対位置を用いた。視点移動の映像には視点の相対位置が (x, y) の2次元で書込まれており、 $1/30$ 秒単位で出力される。これを視

点移動解析装置（ナック：V-99、及びEMR-Vデータ解析ソフトウェア）を用いて解析することができる。本実験では被験者の視点移動、特に文章をスーパーインポーズして居る間、映像と解説文章をどのように読んでいるかを調べた。

瞳孔面積については、動画と静止画で、解説文章を提示した場合、被験者の興味がどのように変るかを調べるために、各パターンごとに解説文章を提示している間の瞳孔面積を測定した。

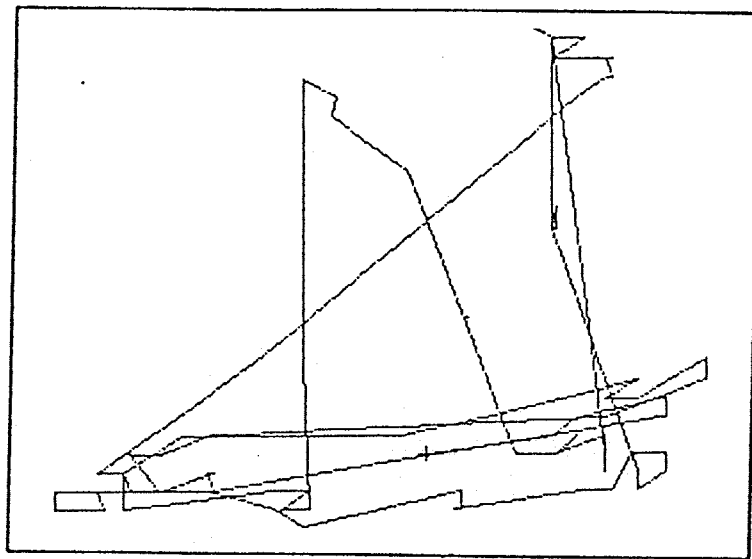
その後簡単なインタビューを被験者に対して行ない、スーパーインポーズの文章について感想をきいた。

実験は東京工業大学の学生11名を被験者として行なった。

7. 3 実験結果

7.3.1 動画、静止画における視点移動

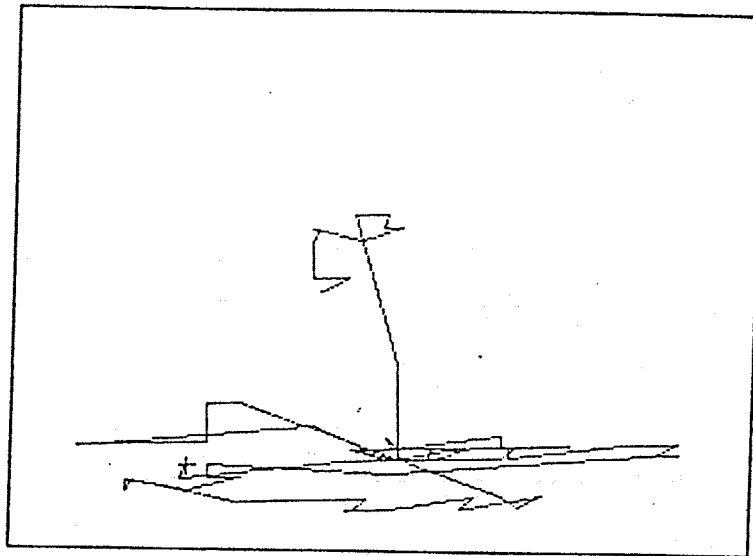
解説文章を提示した時の視点移動を動画と静止画について調べた。そのうち動画、静止画に解説文章をスーパーインポーズしたときの代表的な視点の動きをそれぞれ図7-2、3に示す。これらの図は1パターン中に解説文章が提示されている6秒間の視点移動であり、先に示したアイマークレコードから出力される相対位置を用いている。画面の下部で視点が何度も往復している部分があるが、この部分は解説文章が提示された場所である。まず図7-2に示す動画の場合は、視点は最初、解説文章の冒頭に移動し、文章を読み始めるが、背景の映像が動き続けるので、視点が映像部分に移ったり、解説文章部分に戻ったりしながら文章を読み、読み終えた後も文章や映像に目を移したりするため、その視点の動きは解説の文章とその他を結ぶ何本かの線になる。この図7-2では5本現われている。また、その視点移動の軌跡が直線になっていることから、読みながら映像を極めて短い時間だけ見て、解説文章に戻っていることがわかる。それに対して図7-3に示す静止画の場合は背景に関係なく解説文章を読み、一度読み終えた後も文頭あるいは途中から読みなおしている。そして読みなおした後に、映像部分に視点が移動していることがわかる。静止画では背景の映像が静止しているので、解説文章に注意が集中している様子がよくわかる。



(On moving picture)

図 7 - 2 . 動画に文章をスーパーインポーズした時の視点移動

Fig. 7-2 Eye movement to text graphics superimposed
on a moving picture.



(On still picture)

図 7 - 3 . 静止画に文章をスーパーインポーズした時の視点移動

Fig. 7-3 Eye movement to text graphics superimposed
on a still picture.

7.3.2 動画、静止画での文章の読切時間

実験方法で述べたように、文頭に視点が達してから初めて文末に達するまでの時間を測定した。前節で述べたように、動画の場合などは解説文章を黙読している最中でも、映像を見ることがある。ここで測定する時間には途中で映像を見ている時間や部分的に読返す時間も含めており、文頭から文末までの文章全体を1回読むのにかかった時間を読切時間と定義する。被験者の視点が解説文章の文末にまで達しない場合は欠損値とした。

それぞれのパターンについて測定し、動画と静止画について集計した結果を図7-4に示す。結果からわかるように動画にスーパーインポーズされた解説文章を読む時間の方が静止画に比べ長い。この結果についてt検定を行なったところ、0.1%水準で有意な差がえられた。すなわち、解説文章の読切時間は動画の方が静止画よりも長くなる。

この2つの画面における読切時間の関係を示すために、横軸に動画での読切時間、縦軸に静止画での読切時間としてそれぞれの被験者の結果を図7-5に示した。同図において原点からの傾き45度の破線は動画と静止画で読切時間が同じであることを示している。図7-5の結果からわかるように全ての被験者において、動画の解説文章を読み切る時間の方が静止画の読切時間を上回っている。このことから動画と静止画にスーパーインポーズされた同じ長さの文章を読み切る時間は動画の方が長くかかり、その原因は背景の動画に注意が奪われるためであると考えられる。

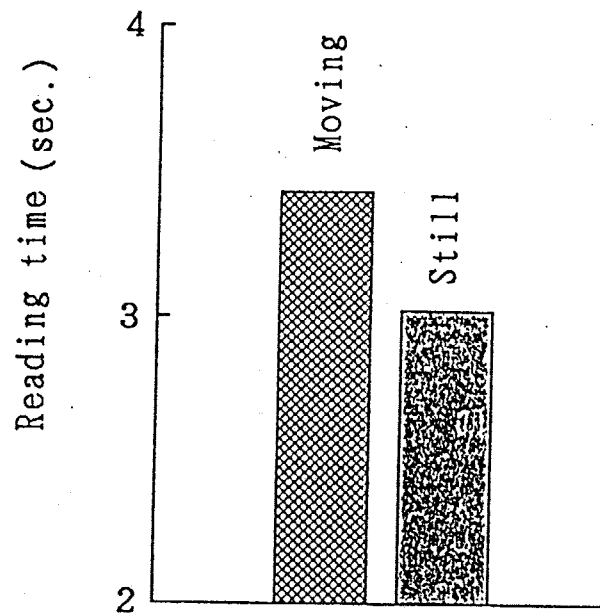


図 7 - 4 . 動画、静止画における読切時間

Fig. 7-4 Reading time on moving and still pictures obtained from all subjects.

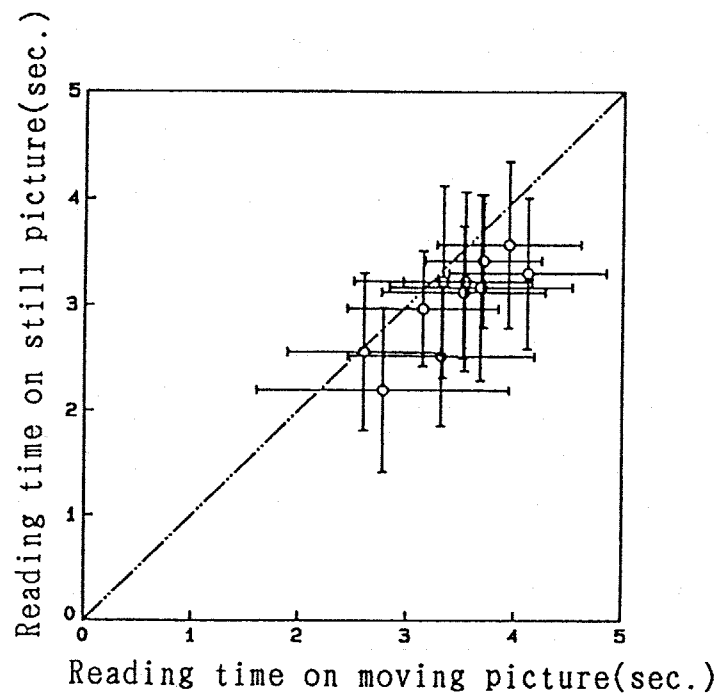


図 7 - 5 . 各被験者ごとの動画、静止画における読切時間

Fig. 7-5 Reading time on moving and still pictures for each subject.

7.3.3 文字スーパーに対する停滞率

前節では解説文章を読み切る時間を測定したが、本節では解説文章提示中の視点に注目し、全パターンについて解説文章を読んでいる時間と文章以外の映像を見ている時間を比較した。視点移動の解析ソフトウェアを用いると視野映像をメッシュによっていくつかのセルに分割して、それぞれのセルに視点が留った時間を積算することができる[27]。ここでは解説文章上に視点があつた時間を文章上への停滞時間と定義する。この方法で提示画面上に停滞した時間を調べることによって、解説文章、映像それぞれに停滞した時間を全パターンについて積算した。動画、静止画とも解説文章がスーパーインポーズされている総時間は、120秒である。図7-6に積算結果の例を示す。図中に示された各セルの数字の10分の1の値が、それぞれのセルへの停滞時間である。図7-7に動画、静止画での解説文章上への停滞時間の結果を示した。横軸は動画での解説文章上への停滞時間、縦軸は静止画での解説文章上への停滞時間である。また、提示時間に対する停滞時間を停滞率と定義する。動画、静止画の停滞率の結果を図7-8に示す。

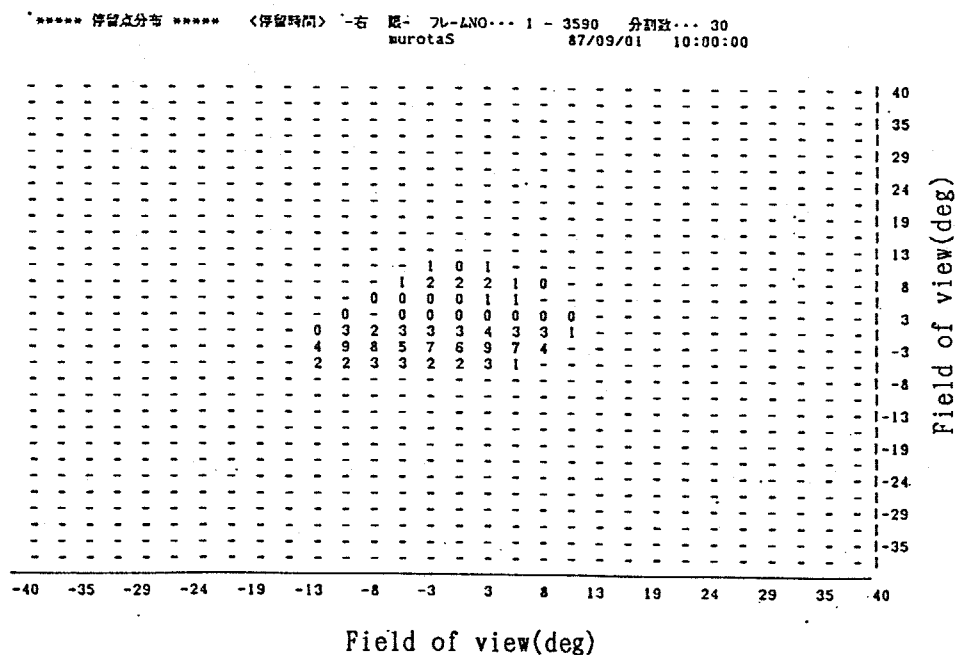


図7-6. 停留時間の積算結果の例

Fig. 7-6 A integration of fixation time on still patterns.

それぞれの解説文章上への停滞率は、動画において81%、静止画において84%であった。以上より静止画での解説文章上に停滞する時間の方が長いことがわかる。t検定の結果、解説文章については10%水準で有意な差が得られた。すなわち、解説文章に対する停滞時間は背景が静止画の方が、映像上への停滞時間は動画の方が長い。このことから動画よりも静止画に文章をスーパーインポーズした方が、学習者の文章全体あるいは文章中の一部を読返す回数は多くなると言える。

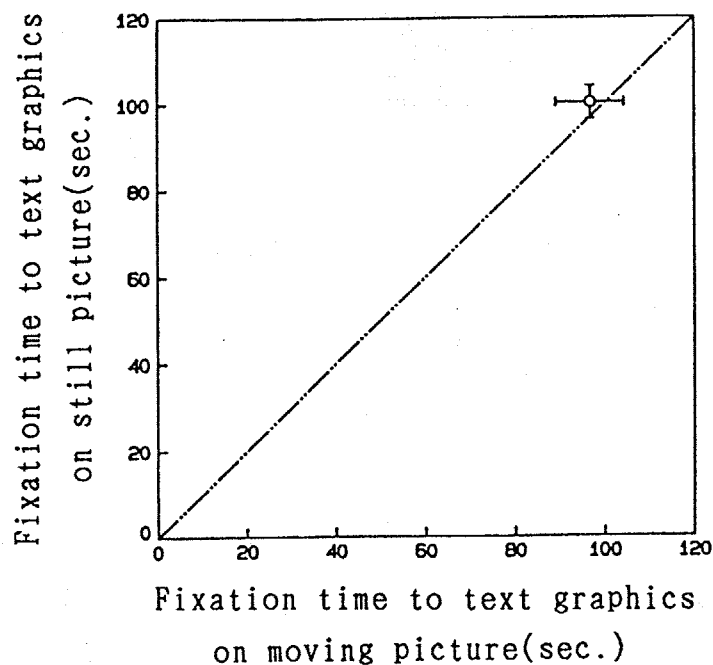


図7-7. 動画、静止画における文章上への停滞時間

Fig. 7-7 Gazing time to text graphics superimposed
on moving and still pictures.

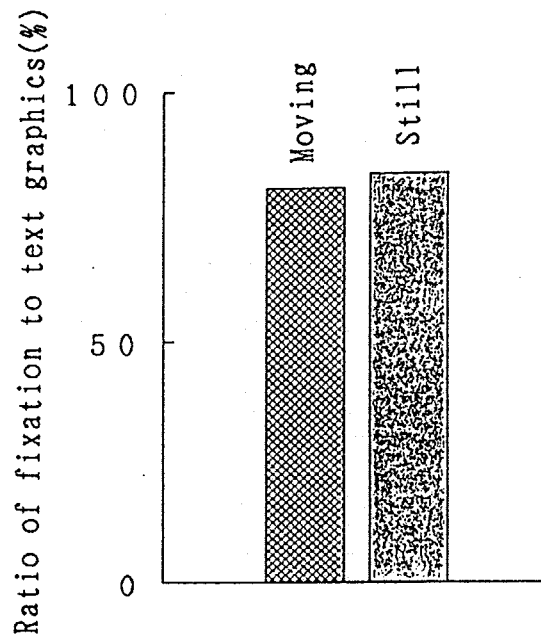


図 7 - 8 . 動画、静止画における文章上への停滞率

Fig. 7-8 Ratio of fixation to text graphics
on moving and still pictures.

7.3.4 被験者へのインタビュー

実験終了後、提示パターンについて感想を聞いた。その結果、題材がシルクロードであったため、中国の歴史的な地名、人名が多く読みづらかったこと、また、スーパーインポーズされた文章の見やすさについては読むことは可能であったが、背景の色によっては見にくい部分があったこと、などの指摘があった。

これらの結果から、スーパーインポーズする解説文章は、平易な文章で、しかも、背景を考慮して提示することが必要であると考えられる。

7. 4 瞳孔面積との関係

7.4.1 動画、静止画における瞳孔面積

動画、静止画での解説文章への注意の度合いを調べるため、動画、静止画において解説文章がスーパーインポーズされている6秒間の瞳孔面積変化を調べた。瞳孔面積は6秒間の平均瞳孔面積で評価した。それぞれの被験者によって瞳孔面積の大きさが異なっているため、動画、静止画での全パターンでの瞳孔面積の平均値を1.0として正規化した。この値を相対瞳孔面積と定義する。動画、静止画別に集計した相対瞳孔面積の結果を図7-9に示す。図からわかるように、瞳孔面積の大きさにはほとんど差がない。t検定によっても有意な差は得られなかった。

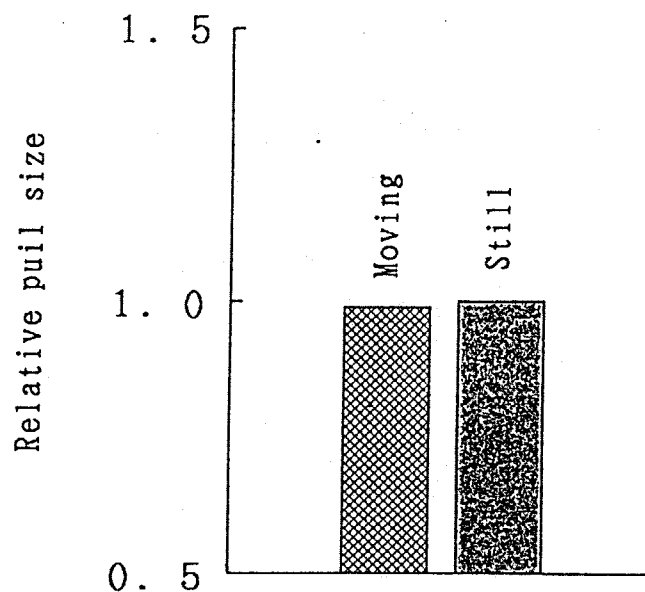


図7-9. 動画、静止画における相対瞳孔面積

Fig. 7-9 Pupil size in moving and still pictures.

7.4.2 画面の輝度との関係

本実験では、実際のテレビ番組を使って実験を行なったため、各パターンの輝度は統一されておらず、各パターンともその輝度はまちまちである。テレビ番組に限らず、提示物の輝度が統一されていることは稀な例である。そこで、輝度を統一しないパターンを提示した時の結果として、輝度との関係について分析を行なった。

各パターンの輝度は画面全体の輝度で評価した。特に動画については、1秒おきに画面全体の輝度を測定し、6秒間の動画について、1秒おきの輝度の平均をそのパターンの輝度とした。

各パターンの輝度と瞳孔面積の関係を動画、静止画の場合について調べた。動画の結果を図7-10に、静止画の結果を図7-11に示した。いずれの図においても、輝度と瞳孔面積との間の回帰直線を書入れている。

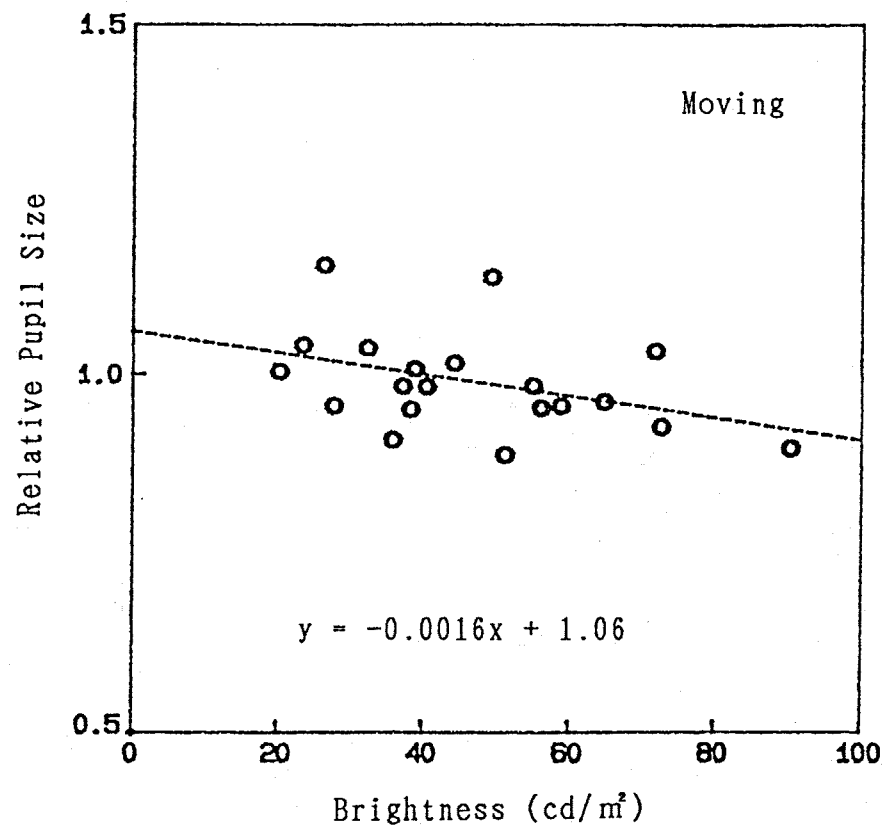


図 7 - 1 0 . 動画におけるパターンの輝度と瞳孔面積の関係
 Fig. 7-10 Relations of pattern brightness and pupil size
 in moving patterns.

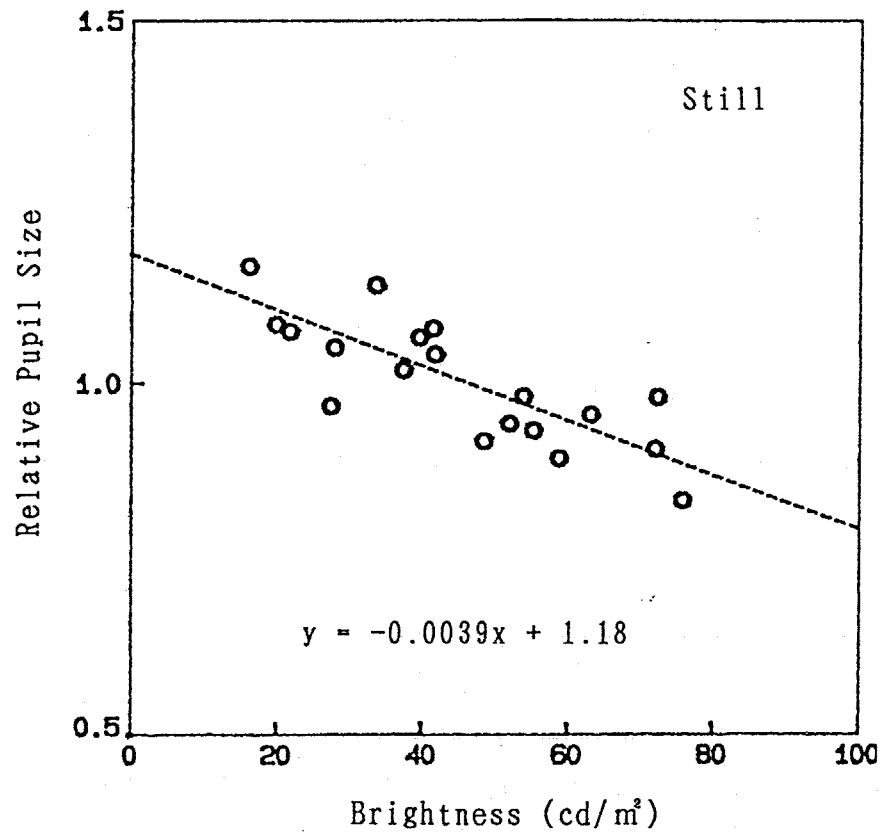


図 7 - 1 1 . 静止画におけるパターンの輝度と瞳孔面積の関係
 Fig. 7-11 Relations of pattern brightness and pupil size
 in still patterns.

輝度と相対瞳孔面積とのそれぞれの相関係数を、表 7 - 1 に示した。表の結果からわかるように両方とも負の相関関係があるが、相関係数の絶対値は静止画の方が動画のそれよりも大きくなっており、静止画においての方が輝度と瞳孔面積の相関関係が強いと言える。これは図 7 - 1 0、1 1 においても言える結果で、それぞれの回帰直線を比較すると、動画における方が傾きの絶対値は小さい。すなわち、動画における方が輝度の影響を受けにくい結果となる。しかし、この結果は動画内での輝度の変化が瞳孔面積に反映されていないことも意味しており、動画の評価を瞳孔面積で行なうためには、さらに細かい検討が必要であることを示唆している。

表 7 - 1 . 動画と静止画におけるパターンの輝度と相対瞳孔面積との相関係数

Table 7-1. Correlation coefficient of pattern brightness and
relative pupil size.

	動 画	静止画
輝度との相関係数 (r)	-.24	-.54
(有意性)	(0.00)	(0.00)

7. 5 まとめ

本実験では動画と静止画に解説文章をスーパーインポーズした時の視点移動について調べた。その結果、以下のことがわかった。

- ①動画の場合は、視点は解説文章と文章以外の映像上を移動するが、静止画では主に解説文章上を移動する。
- ②動画の場合は、映像を見ながら文章を読むため文章の読切時間は、静止画の場合より長く、これは0.1%水準で有意差がある。
- ③文章上への停滞時間については静止画の方が長く、これは10%水準で有意差がある。
- ④瞳孔面積で動画と静止画の評価を行なったところ、瞳孔面積と輝度との相関係数は静止画における方が動画におけるよりも高いことがわかった。

残された課題として、動画の評価を瞳孔面積で行なうためには、輝度の変化と瞳孔面積の変化をさらに細かく測定するなどの、評価方法を検討することである。

第 8 章

結 論

本論文は瞳孔面積や視点移動の眼球運動から、学習者の内的な変化を観察することと、映像や教育技法の評価を行なうことを目的として、研究を行なった。

本論文で得られた結果を4つの領域に分けてまとめると以下ようになる。

明るさに対する瞳孔変化に関して

(1) 瞳孔面積の大きさがどれだけの領域の大きさの輝度によって決まるかを調べるため、明領域と暗領域からなり、空間周波数が $0.056 \sim 0.301 \text{c/deg}$ のパターンを提示して、瞳孔面積を測定した。その結果、瞳孔面積はパターン全体の平均輝度だけでなく、注視領域の影響も受けて変化することがわかった。例えば、提示パターンの平均輝度が 26cd/m^2 と暗い時には、視野角が約3度の領域の輝度により瞳孔が変化するが、平均輝度が 119cd/m^2 と明るくなると、視野角が約9度と3倍の領域の輝度によって瞳孔面積が決まる。(第3章)

(2) 明、暗領域の視野角が30度のパターンを提示し、それぞれの領域への注視する時間を1、2、4、6秒と変化させた時の瞳孔面積を測定すると、注視する時間が2秒以上では、視野角30度の領域の輝度によって瞳孔面積は変化するが、注視する時間が1秒では、瞳孔面積は変化しない。(第3章)

瞳孔の精神活動による変化に関して

(3) パターン提示中に、そのパターンに関する音声による課題を与えたり、その予告を与えると、課題によって学習者のアクティビティのレベルが高められ、約30%瞳孔面積が増大する。また、意味のないパターンを提示中に音声によって計算問題を与えると、約10%瞳孔面積が増大する。したがって、課題に対して考えるという精神活動そのものが、瞳孔を変化させている。(第4章)

(4) パターンを提示中に課題を与えると、瞳孔面積は輝度と精神活動の2つの

要因によって変化するが、両者はそれぞれ独立に瞳孔面積を変化させることを明らかにした。また、輝度の要因と精神活動による要因を分離し、精神活動の要因だけに基づく瞳孔面積変化を抽出する方法を示した。(第5章)

音環境の評価について

(5) 無音、BGM、CM音、雑音の音環境で、平仮名文を音読すると、音読速度、瞳孔面積とも無音の音環境が最大となり、音がある環境では、音読速度、瞳孔面積とも低下する。(第6章)

(6) 音楽を好んで聞いている被験者はBGMが流れても、音読速度はあまり低下しないが、BGMに慣れていない被験者は、大きな影響を受ける。また、これとは逆に、テレビをよく見ている被験者はCM音が流れると、音読速度が大きく低下する。(第6章)

(7) BGMの音圧レベルを上げても、音読速度はあまり変化しないが、雑音の音圧レベルと上げると、音読速度は大きく低下する。(第6章)

視点移動による教育番組の評価について

(8) 動画と静止画に解説文章をスーパーインポーズして、解説文章の読み方を視点移動から調べると、動画と静止画では視点移動が異なり、静止画で提示した方が被験者の注視点が解説文章に留る割合が高い。(第7章)

本研究に残された課題として、以下の問題があげられる。

- ①自動的に輝度変化に対応し、精神活動のみによる瞳孔面積変化測定システムの開発
- ②動画のような輝度が時々刻々と変化する提示物の場合の瞳孔面積による評価法の研究
- ③瞳孔面積が増大するとアクティビティレベルが高くなったと考えたが、それがどのような教育的意味を持つのか、記憶と相関があるのかなどの実践的な意味での研究

④本研究では眼球運動を、視覚パターンについての評価に用いたが、様々な学習行動にも応用できるかについての研究

⑤視点移動データの教育工学的解釈および評価法の研究

本論文では以上の様な結論を得たが、教育評価は1つの評価法だけで行なうべきではなく、内面的、外面的な行動などの様々な観点から評価していくことが必要であると考えられる。さらに、実験室レベルばかりでなく、実際の教育の場においても容易に利用されうるものが必要である。しかし、従来まで、測定が難しかった学習者の内的な反応をリアルタイムで測定することができ、その結果を利用して、視覚パターンへの興味や学習環境の評価が行なえ、学習者の内的な行動が多少なりとも科学的に捉えられることを示したことは、意義が大きいと考えられる。

謝 辞

本研究を遂行するにあたり、終始適切な御指導を下さいました、東京工業大学教育工学開発センター清水康敬教授に心より感謝致します。清水教授には昭和60年の4月に同センター清水研究室に研究生として所属し、本研究の機会を得て以来、絶えず助言と励ましをいただき、学位論文をまとめるにまで至ることができました。

また、終始御指導と御助言を下さいました東京工業大学総合理工学研究科坂元昂教授、ならびに繁栴算男助教授に心から感謝致します。本研究に対し、数々の御指導と御助言をしていただきました東京工業大学総合理工学研究科長（前教育工学開発センター長）市川惇信教授、同研究科小林重信助教授に深く感謝致します。

さらに、本研究に対し、瞳孔面積の測定法をはじめとする御指導を下さいました東京工業大学工学部前迫孝憲助教授に深く感謝致します。日ごろより、御指導と励ましの言葉を下さった工学部牟田博光教授と教育工学開発センター赤堀侃司助教授に深く感謝致します。

本研究の第5章は清水研究室の安池一貴君と、第7章はフィリピン工科大学エリザベス助教授(当時)と清水研究室の山本博巳君と共同で研究を行なったものであり、3氏に心から感謝します。また、瞳孔面積測定には山本博巳君が製作した瞳孔面積測定装置を使用させて戴きました。教育工学開発センターの坂口千明技官にはパターンの制作や実験で大変お世話になりました。ここに感謝致します。

東京学芸大学在学当時に、教育工学の分野に導いてくださり、種々御指導下さいました、東京学芸大学教育工学センター井上光洋助教授、学校教育学科篠原文陽児助教授に心より感謝致します。さらに理科教育の立場から御指導を下さいました東京学芸大学田矢一夫名誉教授、寺谷敏介教授に深く感謝致します。本研究は、この他にも、学会関係者等数多くの方の御指導がなくては行なえませんでした。ここに、深く感謝し、御礼申し上げます。

最後に、日頃よりお世話になり、明るい研究生活の場を提供して下さいました清水研究室の皆様に、そして、常に励ましの言葉を送ってくれた両親と姉、友人に心より感謝致します。

本研究に関する報告

(論文)

1. 中山実、エリザベス・P. ジョー、山本博巳、清水康敬
動画と静止画における文字スーパーへの視点移動の違い
テレビジョン学会誌、Vol. 42, No. 8, pp. 846-849 (1988)
2. 中山実、前迫孝憲、清水康敬
音声による課題を与えたときの瞳孔面積変化
科学教育学会誌、「科学教育研究」、Vol. 12, No. 3, pp. 90-97 (1988)
3. 中山実、清水康敬
音環境が与える音読速度への影響と瞳孔面積変化
日本音響学会誌、Vol. 45, No. 5, pp. 368-373 (1989)
4. 中山実、安池一貴、清水康敬
提示画面の輝度変化と画像内容による瞳孔面積変化
テレビジョン学会誌、平成2年3月号掲載予定
5. 中山実、清水康敬
精神活動時の瞳孔面積変化と輝度の影響の除去
日本教育工学会誌、「日本教育工学雑誌」投稿中
6. 中山実、清水康敬
提示映像の輝度と視野角が瞳孔面積に与える影響
テレビジョン学会誌、投稿準備中

(口頭発表)

1. 中山実、前迫孝憲、清水康敬
瞳孔面積変化と精神活動の関連について
日本科学教育学会第9回年会論文集D102、1985
2. 中山実、前迫孝憲、清水康敬
瞳孔面積の心理的变化における視覚刺激と聴覚刺激の関連について
日本教育工学関連学協会連合全国大会講演論文集1B-4、1985
3. 中山実、前迫孝憲、清水康敬
課題を与えた精神活動時の瞳孔面積変化
昭和61年度電子通信学会総合全国大会講演論文集[分冊7]2730、
1986
4. 前迫孝憲、中山実、清水康敬
頭部の動きを補正するアイマークレコード用注視点測定装置の開発
電子通信学会技術報告ET86-7、1986
5. 中山実、前迫孝憲、清水康敬
注視点の輝度差が瞳孔面積に与える影響
電子情報通信学会創立70周年記念総合全国大会講演論文集[分冊7]
2661、1987
6. 中山実、前迫孝憲、清水康敬
音声による課題を与えた時の瞳孔面積変化
電子情報通信学会技術報告ET87-2、1987

7. 中山実、清水康敬
音響環境が与える瞳孔面積変化と音読速度への影響
日本教育工学会第3回大会講演論文集、p.401-402、1987
8. エリザベス・P. ジョット、中山実、山本博巳、清水康敬
文字スーパの動画と静止画における視点移動の違い
電子情報通信学会技術報告ET87-6、1987
9. 中山実、清水康敬
注視点の輝度差が瞳孔面積に与える影響2
昭和63年電子情報通信学会春季全国大会A-170、1988
10. 中山実、清水康敬
音環境の違いによる文章の音読速度と瞳孔面積の変化
日本音響学会秋季研究発表会論文集I、p377-378、1988
11. 中山実、清水康敬
学習時の音環境の評価
教育工学関連学協会連合第2回全国大会論文集、3H08、1988
12. 中山実、清水康敬
輝度と精神活動による瞳孔面積変化
電子情報通信学会春季全国大会、A-134、1989
13. 中山実、安池一貴、清水康敬
提示画面の輝度と精神活動による瞳孔面積変化
電子情報通信学会技術報告ET89-35、1989

14. 中山実、清水康敬

精神活動評価のための瞳孔面積測定－輝度の影響の除去－
日本教育工学会第5回大会、1989年10月

15. 中山実、清水康敬

輝度と視野角による瞳孔面積変化
電子情報通信学会春季全国大会、1990、3月、発表予定

(英語による発表)

1. NAKAYAMA, Minoru and SHIMIZU, Yasutaka

Pupillary changes as an index of learner activity.

The Second Joint Conference of Educational Technology, 1 K 0 4、
1 9 8 8

(その他の論文)

1. 中山実、長峰和仁、清水康敬

メンタルローテーションによる3次元映像の評価
電子情報通信学会論文誌DⅡ、投稿準備中

(その他の口頭発表)

1. 長峰和仁、中山実、清水康敬

メンタルローテーションによる3次元映像の評価
電子情報通信学会技術報告ET89-36、1989

参考文献

- [1] B. S. ブルーム, J. T. ヘスティングス, G. F. マドゥス (梶田 叡一、
渋谷 憲一、藤田 恵璽訳) : "教育評価ハンドブックー教科学習の形成的評価
と総括的評価ー"、第一法規(1973)
- [2] 辰野千寿、高野清純、加藤隆勝、福沢周亮編 : "実践教育心理学 5、測定と
評価の心理"、教育出版(1981)
- [3] 伊藤秀子 : "個人情報をとらえる視点と方法"、教育情報科学 3、pp. 67-95、
第一法規(1988)
- [4] A. J. リン (西本三十二監修) : "学習指導と評価"、平凡社(1975)
- [5] 井上光洋 : "教育工学"、pp. 115-163、第一法規(1984)
- [6] 上月節子 : "心身障害児のテレビ視聴時における生理・心理反応"、日本教
育工学雑誌、Vol. 10, No. 3, pp. 31-42(1986)
- [7] 本間明信 : "授業過程と生理情報"、教育情報科学 3、pp. 245-272、第一法
規(1988)
- [8] 小谷津孝明 : "認知心理学講座 2、記憶と知識"、pp. 102-104、東京大学出
版会(1985)
- [9] 苧阪良二編 : "心理学研究法 3、実験 II"、pp. 1-49、東京大学出版会(1973)
- [10] E. H. Hess : "Attitude and pupil size", Scientific American, Vol. 212,
No. 4, pp. 46-54(1965)
- [11] 船津孝行 : "心的作業負荷の 1 指標としての瞳孔反応ー予備的な考察ー"、
哲学年報、Vol. 28, pp. 67-102(1969)
- [12] J. Beatty: "Task-Evoked Pupillary Responses, Processing Load, and
the Structure of Processing Resources", Psychological Bulletin, Vol.
91, No. 2, pp. 276-292(1982)
- [13] 清水康敬、近藤俊一、前迫孝憲、熊谷龍 : "瞳孔面積測定装置の開発と心理
的变化に関する一検討"、日本教育工学雑誌、Vol. 11, No. 1, pp. 25-33(1987)
- [14] 前迫孝憲、清水康敬 : "頭部の動きを補正する注視点測定装置の開発"、電
子情報通信学会論文誌、J 71 - A, No. 12, pp. 2192-2197(1988)

- [15] 飯田宗夫、伴野明、小林幸雄：“視線検出を利用したヒューマン・インターフェースの一検討”、Human Interface, Vol.4, pp.239-244(1989)
- [16] 小島卓也：“眼球運動計測の精神医学への応用”、アイカメラと眼球運動研究会資料、ナック(1986)
- [17] 伊藤秀子：“観察学習中の眼球運動について(Ⅱ)”、早稲田大学研究紀要別冊第2集、pp.1-19(1975)
- [18] 山田光穂、福田忠彦：“視線の動きからみた行動の分析—放送番組に活用した例から—”、Human Interface, Vol.4, pp.225-232(1989)
- [19] K. T. スペアー、S. W. レムクール(芋阪直行訳)：“視覚の情報処理—<見ること>のソフトウェア”、サイエンス社(1986)
- [20] 田崎京三、大山正、樋渡涓二：“視覚情報処理—生理学・心理学・生体工学—”、朝倉書店(1979)
- [21] 大山正編：“心理学4、知覚”、pp.167-190(1970)
- [22] 荻原朗編：“眼の生理学”(大塚良三：“瞳孔”)、pp.491-523、医学書院(1966)
- [23] 宇都宮敏男編：“生体の制御システム”、pp.331-338、朝倉書店(1978)
- [24] 小松崎篤、篠田義一、丸尾敏夫：“眼球運動の神経学”、pp.1-18、医学書院(1985)
- [25] アイマークレコーダモデルV取扱説明書、ナック(1983)
- [26] 樋渡涓二：“視聴覚情報処理”、昭晃堂(1987)
- [27] E M R-V データ解析ソフトウェア取扱説明書、ナック(1986)
- [28] 問田直幹、内菌耕三：“新生理学、上”、医学書院(1965)
- [29] E. H. Hess, P. W. Beaver and P. E. Shrout: "Brightness contrast effects in a pupillometric experiment", Perception & Psychophysics, 18, 2, pp.125-127(1975)
- [30] 長倉康彦、上野淳、山崎俊裕：“オープンスペースの適正密度を求める実験的研究—学校における学習スペースについて—”、日本教育工学雑誌10、pp.159-172(1986)
- [31] 精選国語 I、pp.2-9、明治図書(1982)
- [32] 御領謙：“認知科学選書5、読むということ”、pp.139-149、東京大学出版

会(1987)

[33]クラッキー(箱田裕司、中溝幸夫訳):”記憶のしくみⅠ”、pp.48-64、サイエンス社(1982)

[34]池田央:”行動科学の方法”、pp.148、東京大学出版会(1971)

[35]精選国語Ⅱ、pp.2-8、明治図書(1982)

[36]精選国語Ⅰ、pp.234-250、明治図書(1982)

[37]安西祐一郎:”問題解決における理解について”、心理学評論、Vol.23, No.1, pp.7-36(1980)

[38](素材)”NHK特集、シルクロード第1集「遙かなり長安」”、LD-DW008-22NH